



**UNIVERSIDAD NACIONAL ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA CIENCIAS DE LA TIERRA

**“RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DESDE CALOR PERDIDO DE ESCORIA
EN PROCESO DE FUNDICIÓN DE COBRE”**

**“PARTE 3: EVALUACIÓN, DISEÑO Y CÁLCULO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA
DESDE ESCORIAS FUNDIDAS”**

CAMILA FERNANDA FAÚNDEZ SILVA

PROFESOR GUÍA: Ph.D. SERGIO RIVERA

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN MINAS**

**SANTIAGO – CHILE
ENERO, 2019**



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA CIENCIAS DE LA TIERRA
DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y PROPIEDAD

Yo, **Camila Faúndez**, declaro que este documento no incorpora material de otros autores sin identificar debidamente la fuente.

Santiago, ENERO de 2019

Firma del alumno

AGRADECIMIENTOS

Durante estos años de estudio, he contado con el apoyo incondicional de mi familia y amigos, ha sido un camino difícil, de momentos bonitos y algunos no tanto. Nadie dijo que esto sería fácil, pero el amor de quienes me rodean me dieron las fuerzas para seguir adelante y culminar esta etapa de la mejor forma posible.

En primer lugar, agradezco a mis padres Fernando Faúndez y Gladys Silva, quienes se esfuerzan día a día para entregarnos lo mejor a mí y a mis hermanos. Quienes me brindaron la oportunidad de poder estudiar en la universidad. Les agradezco el confiar en mí, el darme las fuerzas de seguir luchando por mis metas en días en los que sentía no poder más. Por su amor incondicional.

A mi profesor guía, Ph.D. Sergio Rivera, por depositar toda su confianza en mí para realizar este proyecto, por estar siempre a disposición de sus alumnos, por su apoyo y respeto desde el primer día.

Agradezco a mis hermanos, Macarena y Fernando, quienes solidarizaron conmigo días previos a mis evaluaciones, para que pudiera concentrarme y tener buenos resultados. Por hacerme reír en momentos difíciles y darme su apoyo.

A mis abuelos, Julia y Jorge, por confiar en mí y sentirse orgullosos de mis logros. Por estar siempre pendientes de mí y llenarme de cariño.

A mis compañeras y amigas, Vannia y Natalia, con quienes compartí alegrías, llantos y momentos inolvidables dentro de la universidad. Gracias por ser parte de este proceso, por permanecer unidas y por sentirse felices por los logros de cada una de nosotras, por su apoyo y cariño incondicional.

A ti, por ser mi compañero de aventuras, por estar conmigo y darme tu apoyo en todo momento, por confiar en mí y alegrarte de mis logros.

La perseverancia y las ganas de seguir adelante, fueron claves para culminar esta hermosa etapa.

A todos, muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	iii
Índice de ilustraciones.....	vi
Índice de tablas.....	vii
Índice de gráficos.....	ix
INTRODUCCIÓN	1
PRESENTACIÓN DEL TEMA.....	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos.....	3
Capítulo I: Proceso pirometalúrgico del cobre	4
1.1 Fusión.....	5
1.2 Conversión	6
1.3 Refinación	6
1.4 Limpieza de escorias	6
1.5 Tecnologías de fusión – conversión.....	7
1.5.1 Fusión por calentamiento directo	7
1.5.2 Fusión en baño	7
1.5.2.1 Soplado superior	8
1.5.2.2 Soplado inferior	8
1.5.2.3 Soplado lateral	8
1.5.3 Fusión por inyección en baño líquido (Flash).....	9
1.6 Conversión discontinua	9
1.7 Conversión continua	9
1.8 Tecnologías de fundiciones en Chile y el mundo	9
1.8.1 Análisis geográfico y temporal.....	10
CAPÍTULO II: GRANALLADO DE ESCORIA	12
2.1 Escoria de Cobre	12
2.2 Granalla.....	12
2.3 Escoria de cobre en Chile.....	13
2.4 Escoria de cobre en China.....	13
2.5 Aparato utilizado para la granulación	14
2.6 Procedimiento.....	15

CAPÍTULO III: PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LA GRANALLA DE ESCORIA.....	18
3.1 Construcción del baño térmico y procedimiento.....	18
3.2 Resultados experimentales.....	20
3.3 Modelo termodinámico	22
CAPÍTULO IV: INTRODUCCIÓN A RECUPERACIÓN DE ENERGÍA.....	24
CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE ESCORIA GRANALLADA.....	27
CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN DE INTERCAMBIO Y RECUPERACIÓN DE ENERGÍA.....	29
6.1 Cálculos para 5% de Cu	30
6.2 Cálculos para 10% de Cu	33
6.3 Cálculos para 15% de Cu	36
6.4 Cálculos para 35% de Cu	39
6.5 Cálculos para 50% de Cu	42
CAPÍTULO VII: PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA.....	45
7.1.1 Potencial hidroeléctrico de Chile	46
7.1.2 Tipos de centrales hidroeléctricas	46
7.1.3 Centrales hidroeléctricas que son parte de generadoras de Chile.....	47
7.2 Planta Solar	47
7.2.1 Capacidad instalada de energía solar	48
7.2.2 Tipos de centrales solares	48
7.2.3 Centrales solares que son parte de generadoras de Chile	48
7.3 Planta eólica	48
7.3.1 Capacidad instalada de energía eólica.....	49
7.3.2 Tipos de centrales eólicas	50
7.3.3 Centrales eólicas que son parte de generadoras de Chile	50
7.4 Planta térmica.....	50
7.4.1 Capacidad instalada de energía térmica	51
7.4.2 Centrales termoeléctricas que son parte de generadoras de Chile	51
7.5 Bioenergía	52
7.5.1 Capacidad instalada en bioenergía	52
7.5.2 Tipos de centrales de bioenergía	53
7.5.3 Centrales que son parte de generadoras de Chile	53
7.6 Planta geotérmica.....	53

7.6.1 Tipos de centrales geotérmicas.....	54
CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS FODA DE ESTA SUGERENCIA Y COMPARACIÓN CON ALTERNATIVAS	56
CAPÍTULO IX: DISCUSIONES	58
CAPÍTULO X: CONCLUSIONES	59
REFERENCIAS	60

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Procesos en la fundición de cobre. (Fuente: Comisión Chilena del Cobre).....	5
Ilustración 2. Esquema de horno de conversión continua de lecho empacado. (Fuente: Díaz, 2012.)	10
Ilustración 3. Participación porcentual de china y otros países en capacidad de fusión y refinación (Fuente: Cochilco)	13
Ilustración 4. Esquema de aparato utilizado para la granulación y granulación de escoria fundida. Liu, J. (2016). Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in slag cement. School of Metallurgy. Northeastern University, PR China.	14
Ilustración 5. Estructura terminada (Fotografía: David Carrero).....	15
Ilustración 6. Granulador visto en tres posiciones diferentes (Fotografía: David Carrero)	15
Ilustración 7. Fundición de Aluminio (10 gr.). La imagen A muestra el aluminio en estado sólido aún, mientras que en la imagen B se encuentra ya fundido (Fotografía: David Carrero Valdés).....	16
Ilustración 8. Granulación de aluminio (40 gr.). (Fotografía: David Carrero Valdés)	17
Ilustración 9. Ejecución experimental (Fotografía: Vannia Torres y Natalia Cepeda)	19
Ilustración 10. Baño térmico y medición de temperatura (Fotografía: Vannia Torres y Natalia Cepeda)	19
Ilustración 11. Reacciones de concentrado de cobre (Fuente: Curso pirometalurgia, Universidad de Chile, Otoño 2009)	26
Ilustración 12. Esquema del equipo generador de electricidad mediante granalla de escoria de cobre. (Fuente: Elaboración propia).....	27
Ilustración 13. Equipo generador de electricidad y sus circuitos. (Fuente: Elaboración propia).	28
Ilustración 14. Planta hidroeléctrica. (Fuente: www.generadoras.cl)	45
Ilustración 15. Planta solar. (Fuente: www.generadoras.cl).....	47
Ilustración 16. Planta eólica. (Fuente: www.generadoras.cl)	49
Ilustración 17. Planta térmica. (Fuente: www.generadoras.cl)	51
Ilustración 18. Planta bioenergía. (Fuente: www.generadoras.cl).....	52
Ilustración 19. Planta geotérmica. (Fuente: www.generadoras.cl)	54
Ilustración 20. Análisis FODA. (Fuente: www.analisisfoda.com)	56

Índice de tablas

Tabla 1. Fundiciones Chilenas y Capacidad de Tratamiento. (Fuente: www.mch.cl , Agosto 2015).....	5
Tabla 2. Zonas de interés y Participación en capacidad de ánodos. (Fuente: Cochilco).....	11
Tabla 3. Cp correspondiente a cada Slag (Fuente: Tesis Vannia Torres y Natalia Cepeda)	20
Tabla 4. Parámetros polinomiales (Fuente: Tesis Vannia Torres y Natalia Cepeda)	21
Tabla 5. Ecuaciones polinómicas para cada parámetro (Fuente: Elaboración propia)	23
Tabla 6. Parámetros para el cálculo de Cp (Fuente: Elaboración propia).....	23
Tabla 7. Datos calculados de Cp (Fuente: Tesis Vannia Torres y Natalia Cepeda)	23
Tabla 8. Reacciones de oxidación de fusión de concentrado de cobre (Fuente: Curso pirometalurgia, Universidad de Chile, Otoño 2009)	25
Tabla 9. Valores de parámetros, Cp y Q (cal) para 5% de Cu. (Fuente: Elaboración propia).....	30
Tabla 10. MW producidos con eficiencia 80% (Fuente: Elaboración propia)	30
Tabla 11. MW producidos con eficiencia 70% (Fuente: Elaboración propia)	31
Tabla 12. MW producidos con eficiencia 60% (Fuente: Elaboración propia)	31
Tabla 13. Valores de parámetros, Cp y Q (cal) para 10% de Cu (Fuente: Elaboración propia).....	33
Tabla 14. MW producidos con eficiencia 80% (Fuente: Elaboración propia)	33
Tabla 15. MW producidos con eficiencia 70% (Fuente: Elaboración propia)	34
Tabla 16. MW producidos con eficiencia 60% (Fuente: Elaboración propia)	34
Tabla 17. Valores de parámetros, Cp y Q (cal) para 15% de Cu (Fuente: Elaboración propia).....	36
Tabla 18. MW producidos con eficiencia 80% (Fuente: Elaboración propia)	36
Tabla 19. MW producidos con eficiencia 70% (Fuente: Elaboración propia)	37
Tabla 20. MW producidos con eficiencia 60% (Fuente: Elaboración propia)	37
Tabla 21. Valores de parámetros, Cp y Q (cal) para 35% de Cu (Fuente: Elaboración propia).....	39
Tabla 22. MW producidos con eficiencia 80% (Fuente: Elaboración propia)	39
Tabla 23. MW producidos con eficiencia 70% (Fuente: Elaboración propia)	40
Tabla 24. MW producidos con eficiencia 60% (Fuente: Elaboración propia)	40
Tabla 25. Valores de parámetros, Cp y Q (cal) para 50% de Cu (Fuente: Elaboración propia).....	42
Tabla 26. MW producidos con eficiencia 80% (Fuente: Elaboración propia)	42
Tabla 27. MW producidos con eficiencia 70% (Fuente: Elaboración propia)	43
Tabla 28. MW producidos con eficiencia 60% (Fuente: Elaboración propia)	43
Tabla 29. Participación energía eléctrica. (Fuente: www.energetica.cl).....	46
Tabla 30. Cuencas y su potencial hidroeléctrico. (Fuente: Ministerio de Energía, Estudio de Cuencas, 2016.)	46
Tabla 31. Planta solar y su participación. (Fuente: www.generadoras.cl).....	48

Tabla 32. Planta eólica y su participación. (Fuente: Ministerio de Energía, Energía Abierta, 2017)	50
Tabla 33. Energía térmica y su participación. (Fuente: Ministerio de energía. Energía Abierta, 2017)	51
Tabla 34. Bioenergía y su participación. (Fuente: WEC, World Energy Resources – Biomass, 2016)	52
Tabla 35. Centrales eléctricas en Chile y su producción en MW (Fuente: www.centralenergia.cl , Elaboración propia).	55

Índice de gráficos

Gráfico 1. Variación de C_p vs T de todos los Slag (Fuente: Tesis Vannia Torres y Natalia Cepeda)	21
Gráfico 2. Valores de parámetros polinomiales (Fuente: Tesis Vannia Torres y Natalia Cepeda)	22
Gráfico 3. Temperatura final de granalla vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)	32
Gráfico 4. Temperatura final 200°C vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)	32
Gráfico 5. Temperatura final de granalla vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)	35
Gráfico 6. Temperatura final 200°C vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)	35
Gráfico 7. Temperatura final de granalla vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)	38
Gráfico 8. Temperatura final de 200°C vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)	38
Gráfico 9. Temperatura final de granalla vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)	41
Gráfico 10. Temperatura final de 200°C vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)	41
Gráfico 11. Temperatura final de granalla vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)	44
Gráfico 12. Temperatura final de 200°C vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)	44

INTRODUCCIÓN

PRESENTACIÓN DEL TEMA

Hoy en día la minería es la actividad económica más importante de nuestro país. Para el proceso de la obtención del cobre se debe disponer de una gran cantidad de energía. A medida que transcurre el tiempo el uso de la energía eléctrica cada vez es mayor, debido principalmente a su eficiencia para la gestión de las diferentes instalaciones de procesamiento del mineral y por el efecto de gigantismo en los equipos e instalaciones debido a la caída de la ley de cobre en los minerales. Es por ello que se debe enfatizar que sin la energía no es posible avanzar en la minería, resaltando que estamos en una era en la que la tecnología e innovación están gobernando al sector minero. La energía es un tema país, y hay políticas para la implementación de plantas eléctricas de energía limpia (solares, eólicas).

Según un reportaje de la Revista "Construcción Minera" En el periodo 2005-2013, *"la minería aportó el 15% del PIB que registró Chile, generó el 59% de las exportaciones y contribuyó con el 20% del financiamiento fiscal, esto es, uno de cada cinco pesos que recibió el fisco en el periodo indicado fue aportado por la minería. En este escenario, asegurar el suministro energético en el largo plazo y a precios razonables, es hoy uno de los principales desafíos de la industria minera."*

Cochilco ha expresado que el consumo eléctrico para el sector minero *"un 80%, pasando de 21.9 tera watts hora en el 2014 a 39.5 tera watts hora, en el 2025"*. Este pronóstico genera un complejo escenario en los próximos años.

La energía en la ecuación de costo de operación por libra masa de cobre producido representa prácticamente un 40%, por esta razón es que cuando el valor internacional de venta del cobre baja, el poder disminuir este 40% de gasto eléctrico es la diferencia entre sobrevivir o cerrar un proyecto minero.

La energía tiene gran demanda, ha quedado claro. Pero la gran paradoja es que las fundiciones botan energía al medio ambiente en forma de calor cuando las escorias fundidas son arrojadas al suelo, a la tierra, para que se enfríen de 1350 grados Celsius hasta que quedan a temperatura ambiente. Y la cuestión es ¿por qué no se recupera ese calor y se convierte en energía eléctrica. El problema es que, debido a un tema de materiales, no es posible utilizar un intercambiador de calor para recuperar energía de un líquido a 1350 °C. Esta es la razón por la cual nunca se ha intentado.

En el año 2008 el Ph.D. Sergio Roberto Rivera, entonces Ingeniero de Procesos de la empresa Sinclair Knight Merz (SKM) empresa internacional australiana de Ingeniería presentó por primera vez la posibilidad de recuperar la energía de escoria fundida y propuso cómo convertir en energía eléctrica el calor de las escorias. La empresa entregó fondos para que un equipo multidisciplinario evaluara el proyecto. El resultado fue que, desde el punto de vista mecánico, termodinámico, eléctrico, y

sustentable era completamente posible hacerlo. Sin embargo, la empresa decidió que la finalidad no estaba dentro de su ámbito laboral y cerraron el tema.

La solución que se sugirió fue pasar de escoria líquida a 1350 °C a granalla de escoria a 800 °C y luego usar intercambiadores de calor para producir vapor y por medio de un ciclo de vapor, convertir el calor en energía eléctrica.

En el año 2012, Trabajando como ingeniero de procesos para Codelco, en división el Salvador, Sergio Roberto Rivera presentó a la gerencia esta propuesta. La propuesta fue recibida, analizada y guardada. No la desarrollaron.

Así es como ahora, trabajando como investigador docente en UNAB, se ha podido generar un proyecto en el que se desarrollan las bases para poder hacer realidad la propuesta de recuperación de energía desde el calor de las escorias fundidas.

En china hay un investigador Quingbo Yu^[1] quien en Octubre de 2015 publicó un artículo en donde se repite la sugerencia planteada en el año 2008 por Sergio Roberto Rivera, sin embargo, no plantean el proceso completo hasta la recuperación como energía eléctrica. Al lado de esto, en Julio 2017, un grupo de estudiantes de la Universidad Técnica Federico Santa María de Valparaíso^[2] sugieren recuperar energía desde escoria líquida, pero no mencionan más que la intención de querer hacerlo. Es posible que luego de presentar en tantas partes esta sugerencia, les llegó a ellos por medio de conversaciones. Es muy bueno que otras personas, otros investigadores estén viendo esto como una solución técnica posible, después de ser sugerida hace más de 10 años por el supervisor de esta tesis, porque esto aumenta la posibilidad que algún día se haga realidad.

Hasta ahora no se ha podido evaluar ni siquiera teóricamente la eficiencia de esta posibilidad, porque no hay existencia de información termodinámica relacionada a la escoria, y esta es la razón de este proyecto de tres tesis.

El proyecto se desarrolla en tres tesis diferentes, pero con un eje común, lograr plantear las bases para que esta propuesta se haga realidad.

Parte 1: Tesis de Diseño de Equipo Generador de Granallas desde Escoria fundida

Parte 2: Tesis de Estudio Termodinámico de Granalla de Escoria a diferentes concentraciones de Cobre, rango de alta temperatura (800 hasta 400 °C) y baja temperatura (400 hasta 25 °C).

Parte 3: Evaluación técnica, diseño y cálculo de recuperación de energía desde escorias fundidas.

Las tres tesis de este proyecto, de la cual esta tesis es la parte relacionada a Evaluación Técnica, Diseño y Cálculo de proceso de recuperación de energía desde escorias fundidas, están basadas en la propuesta de proceso de recuperación de energía desde escoria fundida presentado por el Ph.D. Sergio Roberto Rivera el año 2008 en SKM (Sinclair Knight Merzt) empresa de ingeniería Australia^[3], la que le

otorgó el premio australiano John Winston Price, sin embargo, no continuó el proyecto porque no estaba dentro de su ámbito de acción; y luego, en el año 2011, presentado a las autoridades de Codelco, División El Salvador^[4], en donde fue analizada y jamás continuada como proyecto.

Objetivo general

Objetivo de la línea de investigación completa (de las tres tesis que la componen).

Dentro de minería existe una etapa llamada fundición, en la cual se genera una cantidad importante de desechos (escorias) que son depositados en el medio ambiente. Estas escorias son depositadas a altas temperaturas y se enfrían dejando escapar toda la energía al medio ambiente. Luego, algunas veces son flotadas para recuperar cobre o son granalladas por conminución para ser usadas como abrasivos, o parte de mortero de materiales de construcción.

El objetivo general de esta tesis, es realizar una evaluación técnica, un diseño y cálculos para generar energía eléctrica a partir de la energía de la escoria fundida a alta temperatura.

Objetivos específicos

Objetivo de esta tesis:

1. Diseñar esquema de equipo generador de energía, a partir de escorias fundidas.
2. Generar balance de energía con datos experimentales obtenidos desde la segunda parte de este proyecto.
3. Realizar cálculos necesarios para obtener los mega watts que generaría el equipo en diferentes condiciones de operación.
4. Comparar resultados con plantas de generación de potencia eléctrica ya existentes en el país.

CAPÍTULO I: PROCESO PIROMETALÚRGICO DEL COBRE

Este capítulo se basa en una presentación de Tecnologías en fundiciones de cobre, agosto del 2015, por la Comisión Chilena del Cobre^[5].

En la industria minera, como lo es el cobre, existen diversos procesos productivos que permiten la concentración y separaciones de los metales contenidos en el mineral.

El proceso para los minerales sulfurados de cobre, representan más de dos tercios de la producción de Chile y cerca de un 80% de la producción mundial del cobre en minería. Los minerales que se extraen desde la mina, son llevados a procesos de conminución y flotación para obtener concentrado de cobre, el que posteriormente es tratado a fundiciones de cobre, lo que permite obtener el metal mediante procesos pirometalúrgicos.

Las fundiciones presentes en Chile son siete, dentro de las cuales cinco de ellas son estatales y las otras dos son privadas, las que se detallan a continuación:

- Codelco:
 - Chuquibambilla
 - Potrerillos
 - Ventanas
 - Caletón
- Enami:
 - Paipote
- Angloamerican Chile:
 - Chagres
- Glencore:
 - Altonorte

En la siguiente tabla, se muestran las fundiciones chilenas con sus respectivas capacidades de tratamiento.

Fundición	Capacidad de tratamiento
Chuquicamata (Codelco)	Capacidad nominal para fundir 1,65 Mta Nivel actual de fusión: 1,3 Mta
Potrerillos (Codelco)	Diseñada para fundir 710 Kta. Nivel actual de fusión: 600 Kta
Ventanas (Codelco)	Diseñada para fundir 420 Kta. Nivel actual de fusión: 400 Kta
Caletones (Codelco)	Diseñada para fundir 1,43 Mta. Nivel actual de fusión: 1,36 Mta
Paipote (Enami)	350.000 toneladas anuales (nominal)
Altonorte (Glencore)	De acuerdo con el presupuesto vigente, las cifras productivas para 2016 alcanzan a 1.000.000 toneladas de concentrado seco fundido, 1.000.000 ton de ácido y cerca de 300.000 ton de ánodos. Por una mantención general programada, las cifras son menores a la capacidad nominal
Chagres (Anglo American)	Durante 2014 se produjeron 129.000 toneladas de ánodos de cobre y 476.000 ton de ácido sulfúrico como subproducto del proceso, a partir de la fusión de 619.000 ton de concentrados

Tabla 1. Fundiciones Chilenas y Capacidad de Tratamiento. (Fuente: www.mch.cl, Agosto 2015)

En el proceso de fundición de cobre es posible distinguir cuatro procesos principales, los cuales son: secado, fusión, conversión, refinación y limpieza de escorias.



Ilustración 1. Procesos en la fundición de cobre. (Fuente: Comisión Chilena del Cobre)

1.1 Fusión

La etapa de fusión es la primera que involucra una concentración de cobre, el cual varía entre un 25 - 30%, ingresando a hornos de fusión a una temperatura cercana a los 1.350°C, lo que permite la descomposición inicial en gases, escoria de óxidos de hierro y mata, eje o metal blanco con un contenido de cobre más alto, entre un 50 y 75%.

La separación entre la escoria y la mata se produce por la diferencia de densidades que existe entre estos productos, siendo más ligera la escoria mientras no se produzca una mayor proporción de magnetita (Fe_3O_4), la que aumenta su densidad y la pérdida de cobre por arrastre.

1.2 Conversión

Para eliminar los residuos de hierro, azufre y otras impurezas de la mata de cobre, se realiza el proceso de conversión, mediante dos etapas: soplado de escoria y soplado de cobre.

Durante la etapa de soplado de escoria, se oxidan los sulfuros de hierro (FeS), generando escoria ($\text{Fe}_2\text{SiO}_4 - \text{Fe}_3\text{O}_4$) y dióxido de azufre (SO_2). Este proceso se realiza hasta obtener menos del 1% de FeS contenido en la mata.

En la etapa de soplado de cobre, se libera cobre contenido en el sulfuro de cobre (Cu_2S) a través de la reacción con oxígeno, obteniendo dióxido de azufre y cobre metálico.

1.3 Refinación

Dado que el cobre blíster ($\pm 98,5\%$ Cu) aun contiene cantidad de oxígeno y azufre que deben eliminarse para evitar la generación de ampollas de SO_2 en el ánodo, se realiza el proceso de refinación, el cual busca generar un producto con estándares de calidad química, física y mecánica.

En la primera parte de la refinación, se realiza un proceso de oxidación, el cual elimina azufre, hierro y otras impurezas metálicas mediante la reacción del oxígeno y posterior gasificación del azufre (SO_2) o la escorificación en otras impurezas metálicas.

Luego, se realiza un proceso de reducción de oxígeno, producto del intenso uso de oxígeno utilizado en la etapa anterior, lo cual aumenta el oxígeno que se encuentra disuelto en el cobre. Se utiliza para ello agentes reductores como: hidrocarburos sólidos, líquidos o gaseosos, los cuales aportan carbono o hidrógeno para lograr la reducción del oxígeno, al formarse dióxido de carbono o vapor de agua.

1.4 Limpieza de escorias

Como se pueden observar en los procesos anteriores de fusión y conversión, se generan distintos tipos de escoria entre sus productos, los cuales al entrar en contacto con productos de cobre producen una cantidad de pérdidas por inclusión

o cobre disuelto en la escoria. Es por esto, que se realiza un proceso de limpieza de escorias, para maximizar la recuperación de las especias valiosas.

Esta limpieza se puede realizar mediante varias alternativas, destacando la vía metalúrgica (chancado, molienda y flotación de escorias), hidrometalúrgico (conminución y lixiviación) y pirometalúrgico mediante hornos de reducción.

En proceso pirometalúrgico, se realiza la reducción utilizando generalmente carbón, el cual reacciona con el oxígeno de la escoria, reduciendo la proporción de magnetita (Fe_3O_4), liberando al cobre oxidado y permitiendo separar el cobre contenido por las diferencias de densidad.

1.5 Tecnologías de fusión – conversión

La fusión y conversión son aquellas etapas de la pirometalurgia del cobre que han tenido un mayor avance tecnológico. Ello, con el fin de tener procesos de manera continua, reducir pérdidas de cobre, elevar las tasas de reacción y obtener un control adecuado de los gases que se producen.

En la fusión, las tecnologías ocupadas se clasifican en: calentamiento directo, en baño, inyección en baño líquido (Flash).

1.5.1 Fusión por calentamiento directo

Durante la primera parte del siglo XX, se utilizaba el horno reverbero, el cual funcionaba con petróleo y era económico debido al bajo costo de éste. Se utilizaba la combustión de hidrocarburos para dar el calor necesario a la fusión. Pero, esta tecnología presenta déficit debido a su ineficiencia térmica y por contener niveles bajos de dióxido de azufre, por lo que su uso se da en pocas ocasiones a nivel mundial.

1.5.2 Fusión en baño

Esta tecnología utiliza la energía proveniente de las reacciones de oxidación que se producen en el reactor. Su origen proviene de la década de los 60 por la empresa Noranda en Canadá.

A nivel mundial, los reactores de fusión de baño de mayor relevancia corresponden a la tecnología Teniente, Noranda, Isasmelt, Ausmelt y Mitsubishi.

Estas tecnologías se clasifican en: soplado superior (top – blowing), lateral (side-blowing) e inferior (bottom – blowing).

1.5.2.1 Soplado superior

Esta tecnología es la que genera más polvo, en comparación a las otras dos, con porcentajes entre 3 y 4%.

1.5.2.2 Soplado inferior

De acuerdo a la literatura de Jie 2013^[6], la tecnología presenta las siguientes características, basadas en las operaciones de Shandong Humon y Shandong Dongying:

- *Mayor energía de burbujeo y menor tiempo de mezcla*
- *Mayor enriquecimiento de oxígeno y mayor grado de fusión autógena*
- *Mayor vida útil de horno y lanzas de oxígeno*
- *Menor ruido*
- *Bajo contenido de magnetita en escoria*
- *Adaptabilidad en la alimentación*
- *Bajo costo de inversión*

El principal problema de esta tecnología es que forma una especie de hongo en la salida de las lanzas, producida por el enfriamiento del material que se encuentra a su alrededor. Esta formación de hongo puede proteger la lanza, pero a su vez hace que el flujo de aire sea entregado fuera del apoyo, provocando salpicaduras en la superficie. De la misma forma, se ve afectado por el mayor contenido de cobre en la escoria (3,5 – 4,5%).

1.5.2.3 Soplado lateral

Esta tecnología logra generar menor cantidad de polvo, en comparación con las otras dos tecnologías. Además, genera menor contenido de cobre en las escorias (cerca al 1%).

Los convertidores Chinfeng sobresalen de los otros por generar una escoria de conversión de cobre con menor cantidad (2,5%), en comparación con los conversores continuos Flash (20%) y Mitsubishi (14%).

1.5.3 Fusión por inyección en baño líquido (Flash)

La tecnología Flash, se basa en la combustión de las partículas de concentrado en suspensión que se genera en las altas torres de reacción, por sobre la zona del baño. Estas tecnologías se dan en las versiones de INCO y Outotec (ex – Outokumpu).

1.6 Conversión discontinua

La conversión de la mata de cobre debe realizarse en distintas cargas, las que deben esperar el término de una para continuar con la otra. Por lo que existen diversos convertidores, principalmente está el convertidor Pierce – Smith (CPS), el cual se basa en la rotación del horno y una boca central que permite la descarga de la escoria y el cobre blíster que se produce, y el de tecnología Hoboken, en menor magnitud, que es una variación del convertidor mencionado anteriormente y minimiza las emisiones fugitivas por la estructura del sifón, sin embargo, se encuentra limitado en su capacidad de incorporar carga fría. Por su parte, la tecnología Top Blown rotatory converter (TBRC), se basa en la inyección de aire y gases mediante una lanza refrigerada, donde su uso se limita en la operación de Ronsskar (Suecia), para la fusión de concentrado de plomo y chatarra de cobre.

1.7 Conversión continua

Esta conversión consiste en el constante ingreso de mata de cobre y un fluido continuo del cobre blíster, sin tener que realizar interrupciones en la operación, además de las mantenciones.

Se destacan las tecnologías de conversión Flash y Mitsubishi, los hornos Ausmelt C3 y de lecho empacado (nuevos desarrollos tecnológicos de conversión continua china desarrollados en la fundición Jinfeng).

1.8 Tecnologías de fundiciones en Chile y el mundo

En el desarrollo tecnológico nacional, se ha presentado un avance tecnológico en el año 2015, con la instalación de una planta piloto a escala industrial en la conversión de lecho empacado (conversión continua Enami, CCE), desarrollada por ENAMI y la Universidad de Chile.

Este proceso consiste en utilizar material refractario en un reactor vertical, que aumenta la superficie de contacto. Esto permite una mayor capacidad de tratamiento en un espacio menor con un flujo de aire en contracorriente.

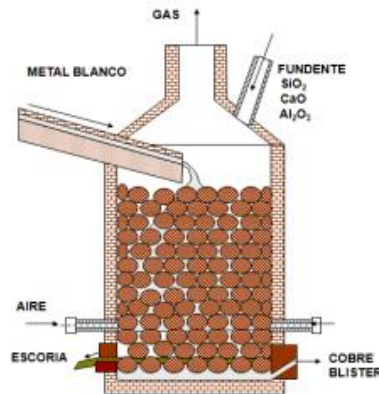


Ilustración 2. Esquema de horno de conversión continua de lecho empacado. (Fuente: Díaz, 2012.)

Las ventajas de esta tecnología son las siguientes:

- Simplicidad en su construcción y operación
- Menor costo de inversión en comparación a la tecnología CPS
- Mayor flexibilidad, que permite incorporar mata líquida, sólida chancada, scrap y otras cargas frías.
- Menores riesgos operacionales, debido a su estructura en forma vertical
- Menores gases fugitivos

1.8.1 Análisis geográfico y temporal

Se han fijado cinco zonas de interés alrededor del mundo: Chile, otros de Latino América, China, otros de Asia y resto del Mundo. La siguiente tabla detalla las fundiciones operativas en cada zona y su capacidad en ánodos por kton.

Zona de interés	Fundiciones en operación	Participación en capacidad ánodos 2014 (kton)
Chile	7	2.008
Otros de Latino América	3	995
China	14	4.515
Otros de Asia	10	4.166
Resto del Mundo	21	5.193
Total	55	16.877

Tabla 2. Zonas de interés y Participación en capacidad de ánodos. (Fuente: Cochilco)

CAPÍTULO II: GRANALLADO DE ESCORIA

Este capítulo se basa en su totalidad en la tesis de ingeniero civil en minas UNAB de David Carrero Valdés, 2018^[7].

2.1 Escoria de Cobre

La escoria es un tipo de desecho sólido proveniente de proceso pirometalúrgico del cobre (fundición), el cual alcanza temperaturas muy elevadas (entre 1350°C y 1450°C). Este proceso se realiza en Chile, vertiendo en el suelo (botaderos), el cobre fundido para su posterior enfriamiento producto de cambios de temperatura presentes en el medio ambiente. Luego, es posible reutilizar esta escoria y refundirla, gracias a su alto porcentaje de cobre contenido en ella.

En el caso de enfriamiento con agua, se utiliza mucho recurso hídrico, además de generar gases que son nocivos para el medio ambiente, como el dióxido de azufre (SO₂) y ácido sulfhídrico (H₂S). por lo que se busca crear un mecanismo de granulación seca.

2.2 Granalla

Son partículas de menor tamaño, de origen metálico (Cu, Fe, Al, Cr, Ni) que son creadas por el enfriamiento rápido del material fundido, según distintos procedimientos utilizados para su creación.

Su forma puede ser angular o esférica, y con diferentes granulometrías, de las cuales dependerá que tan homogénea sea la textura de la partícula a tratar.

Los usos de la granalla dependerán del tipo de metal utilizado para su creación, y ellos pueden ser: tratamiento de acero al carbono, eliminar óxido y calamina, decapar pintura, aumentar rugosidad, limpiar mármol y granito, desbardar acero inoxidable y aleaciones ligeras, limpiar fachadas y monumentos, tratamiento de madera, entre otros.

Para el caso de granalla de escoria, se utiliza en proceso de arenado para el tratamiento de superficies, en el área automotriz para restaurar el pulido y limpiar piezas delicadas, en usos industriales, marítimo y minero, como el caso de instalación de perfil de anclaje.

2.3 Escoria de cobre en Chile

En Chile existen siete plantas de fundición, las que generan un problema para el carguío, transporte y disposición de escoria fundida.

Se estima que en el país se producen cerca de 5,9 millones de toneladas de cobre refinado, lo que genera más de 13 millones de toneladas de escoria de cobre al año (desde 2014), es decir, que por cada cobre blíster producido, se generan aproximadamente 2,2 toneladas de escoria.

2.4 Escoria de cobre en China

China tiene 14 plantas de fundición en la industria minera, por lo que posee más del 35% de la capacidad mundial en fundición y refinación. Es el país que contribuye a que el continente asiático obtenga la mayor capacidad de fundición de cobre, en comparación a los otros continentes, superando los 12 millones de toneladas.

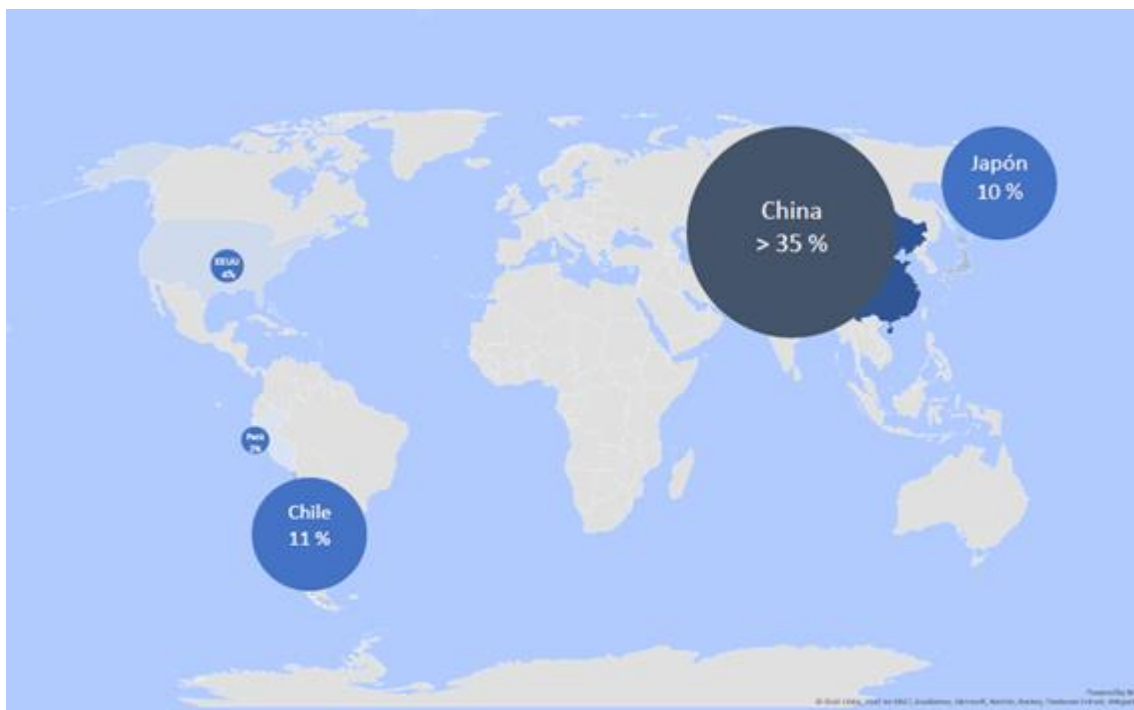


Ilustración 3. Participación porcentual de China y otros países en capacidad de fusión y refinación (Fuente: Cochilco)

Las tres principales fundiciones de cobre en China son:

- Jiangxi Copper.
- Yunnan Copper Ltda.
- Tongling Nonferrous Metal.

Las cuales en conjunto originaron cerca de 197 millones de toneladas de escoria en el año 2012 (generadas a partir de aproximadamente 39 millones de toneladas de cobre blíster). Esta enorme cantidad de escoria contiene la energía térmica equivalente a la contenida en 11,5 millones de toneladas de carbón.

La escoria generada en este país, proviene de industrias acereras, mineras y metalúrgicas.

2.5 Aparato utilizado para la granulación

Este aparato fue creado por David Carrero, el cual consta de la construcción de un equipo capaz de generar granalla de escoria, proveniente de hornos de fundición.

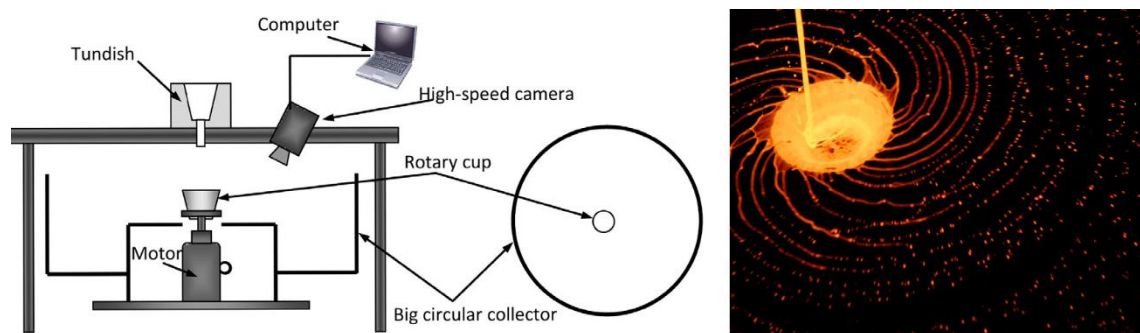


Ilustración 4. Esquema de aparato utilizado para la granulación y granulación de escoria fundida. Liu, J. (2016). Blast furnace slag obtained from dry granulation method as a component in slag cement. School of Metallurgy. Northeastern University, PR China.

Lo primero en realizar fue una estructura protectora de la integridad física del trabajador, ya que se trabaja con temperaturas elevadas. Este consta de una estructura metálica con materiales aislantes del calor, como planchas de tiza prensada, con base rellena de ripio y bloques de concreto para impedir la transmisión de calor al piso y posibles derrames de material fundido.



Ilustración 5. Estructura terminada (Fotografía: David Carrero)

Lo siguiente a realizar fue un granulador seco, que permite generar granalla de escoria mediante la acción de movimiento a diferentes velocidades.

La estructura se realizó con madera de pino, motor de 220 V con tres velocidades (que hace girar un disco en el cual se deposita la escoria fundida), y se adhirió a las planchas de tiza prensada de la estructura anterior para contener la proyección del material particulado.



Ilustración 6. Granulador visto en tres posiciones diferentes (Fotografía: David Carrero)

2.6 Procedimiento

Para la prueba en cuestión se utilizaron las siguientes herramientas:

- 1 horno de fundición.

- 1 soplete.
- 1 tubo de gas licuado.
- 1 crisol capaz de soportar las temperaturas extremas para el proceso de fundición de escoria de cobre.
- 1 embudo
- Pinzas para la manipulación de los crisoles.
- 1 pistola láser para medición de la temperatura.
- 1 cámara de alta velocidad.

Cabe señalar que en este caso se utilizó el material de aluminio para la realización del experimento.

El primer paso fue utilizar el horno de fundición, donde se utilizó la energía proveniente de un cilindro de 15 kilos de gas licuado, guiado por un soplete. Esta energía desembocó en el interior del horno, donde se encontraba un vaso de crisol que contenía aluminio en su interior para ser fundido.



Ilustración 7. Fundición de Aluminio (10 gr.). La imagen A muestra el aluminio en estado sólido aún, mientras que en la imagen B se encuentra ya fundido (Fotografía: David Carrero Valdés)

Una vez alcanzado el estado líquido del metal, se procedió a realizar la atomización del fundido, para originar granallas de aluminio, donde el motor del equipo alcanzó una velocidad de rotación de 1.000 rpm, por lo que el material fundido que ingresó al disco giratorio, fue proyectado en distintas direcciones como material particulado por acción de la fuerza centrífuga.

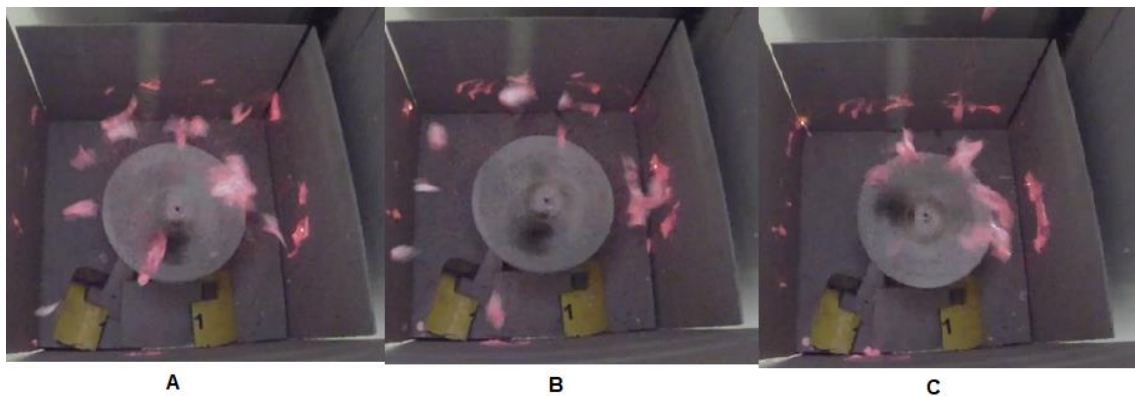


Ilustración 8. Granulación de aluminio (40 gr.). (Fotografía: David Carrero Valdés)

CAPÍTULO III: PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LA GRANALLA DE ESCORIA

Este capítulo se basa en su totalidad en la tesis de ingeniero civil en minas UNAB de Natalia Cepeda López y Vannia Torres Muñoz, 2019^[8].

La escoria es considerada mayormente como un desecho proveniente de procesos de fundición, la cual desperdicia energía que se escapa al medio ambiente sin ser reutilizada en otros procesos. Por lo que, en esta parte, se realizó un modelo capaz de calcular el calor específico de las escorias de cobre (con distinto porcentaje de cobre) a temperaturas que van desde los 60°C hasta los 800°C.

Es importante señalar, que no existe ningún artículo bibliográfico disponible con este tipo de información.

Para la realización de este experimento, se procedió a la construcción de un baño térmico (calorímetro) y posteriormente realizar pruebas necesarias para la obtención de curvas que permitan obtener los resultados deseados.

3.1 Construcción del baño térmico y procedimiento

Para la construcción de este equipo, se utilizó material aislante, para impedir liberación del calor. En su interior posee un vaso de precipitado con una bomba que permite la recirculación del agua y un termómetro para ir midiendo la temperatura alcanzada una vez ingresada la granalla de escoria al sistema.

Para el cálculo del Cp de granalla de escoria se utilizó la siguiente fórmula:

$$\frac{M(\text{agua}) * C_p(\text{agua}) * \Delta T(\text{agua}) + \Delta H(\text{vap}) - G(\text{cal})}{M(\text{granalla}) * \Delta T(t_i - t_f)} = C_p(\text{granalla})$$

Donde:

M = Masa

C_p = Calor específico

ΔT = Temperatura

ΔH = Calor de evaporación

G (cal) = Calor de la bomba

Este proceso consta de tres partes:

1. Sector de quemado: se realiza el proceso de quemado
2. Sector de pesaje: se determina la masa de los implementos

3. Sector de análisis de datos: se traspa la información obtenida al software

Para dar inicio a la parte experimental, se enciende el soplete adherido al balón de gas para iniciar el proceso de quemado, en el cual se procede a calentar el crisol que contiene la granalla, hasta obtener la temperatura deseada.



Ilustración 9. Ejecución experimental (Fotografía: Vannia Torres y Natalia Cepeda)

Posteriormente con la ayuda de unas tenazas se toma el crisol para depositar la granalla en el baño térmico, donde se va midiendo la temperatura con el termómetro. Y finalmente, se realiza un registro de los datos obtenidos, para realizar los cálculos necesarios para la obtención de las curvas que permitirán obtener el valor del C_p de la granalla de escoria.



Ilustración 10. Baño térmico y medición de temperatura (Fotografía: Vannia Torres y Natalia Cepeda)

Este proceso se realizó con granallas de escoria de concentraciones de 5, 10, 15, 35 y 50% de cobre y temperaturas de 60, 130, 180, 300, 400, 500, 600, 700 y 800°C.

Se utilizó una cantidad de masa de granalla de escoria de 12 gramos para altas temperaturas y 82,7 gramos para baja temperatura. Se realizó un total de 55 experimentos.

3.2 Resultados experimentales

Slag n°1 al 5%	T(°C)	Cp. (cal/g °C)
	800	0.44074
	700	0.35876
	600	0.41305
	500	0.40738
	400	0.42027
	300	0.41387
	180	0.20568
	160	0.20125
	130	0.23775
	180	0.20568
	60	0.27262

Slag n°2 al 10%	T(°C)	Cp. (cal/g °C)
	800	0.38710
	700	0.37780
	600	0.34914
	500	0.38165
	400	0.38545
	300	0.46032
	180	0.21684
	160	0.20194
	130	0.19462
	180	0.21684
	60	0.25359

Slag n°3 al 15%	T(°C)	Cp. (cal/g °C)
	800	0.32628
	700	0.45361
	600	0.37027
	500	0.35570
	400	0.40995
	300	0.43390
	180	0.24143
	160	0.21686
	130	0.19462
	80	0.27435
	60	0.22422

Slag n°4 al 35%	T(°C)	Cp. (cal/g °C)
	800	0.21876
	700	0.47193
	600	0.29735
	500	0.40234
	400	0.27457
	300	0.32614
	180	0.19527
	160	0.19255
	130	0.23068
	80	0.28008
	60	0.22836

Slag n°5 al 50%	T(°C)	Cp. (cal/g °C)
	800	0.23397
	700	0.35988
	600	0.35089
	500	0.30363
	400	0.25627
	300	0.32684
	180	0.20763
	160	0.19394
	130	0.19985
	80	0.28008
	60	0.22925

Tabla 3. Cp correspondiente a cada Slag (Fuente: Tesis Vannia Torres y Natalia Cepeda)

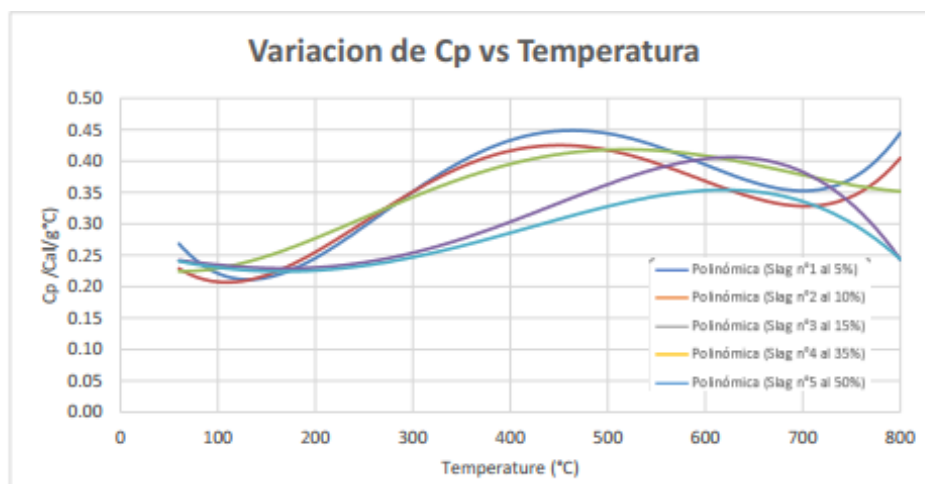


Gráfico 1. Variación de C_p vs T de todos los Slag (Fuente: Tesis Vannia Torres y Natalia Cepeda)

En el gráfico se puede observar un comportamiento variable de las curvas a medida que aumenta o disminuye la temperatura, es por esto que se fijan dos zonas para evaluar, la de baja temperatura y la de alta temperatura, las cuales serán utilizadas para el modelamiento matemático.

Los datos experimentales se comportan como una ecuación polinomial de cuatro grados, con la temperatura como variable, por lo que se tienen 5 parámetros polinomiales: A_0 , A_1 , A_2 , A_3 y A_4 .

	N°1	N°2	N°3	N°4	N°5
% Cu	5%	10%	15%	35%	50%
A0	-5.9847575.E-01	-1.5408650.E+00	-1.8747087.E+00	-1.3006980.E+00	-9.9195796.E-01
A1	6.8181078.E-03	1.7470033.E-02	2.2027840.E-02	1.6090552.E-02	1.2997666.E-02
A2	-1.5116670.E-05	-5.4223443.E-05	-7.4135764.E-05	-5.7249933.E-05	-4.6361104.E-05
A3	1.2425857.E-08	6.9658167.E-08	1.0371471.E-07	8.5938670.E-08	6.9244476.E-08
A4	-2.7043942.E-12	-3.1767922.E-11	-5.1447517.E-11	-4.5662975.E-11	-3.6517987.E-11

Tabla 4. Parámetros polinomiales (Fuente: Tesis Vannia Torres y Natalia Cepeda)

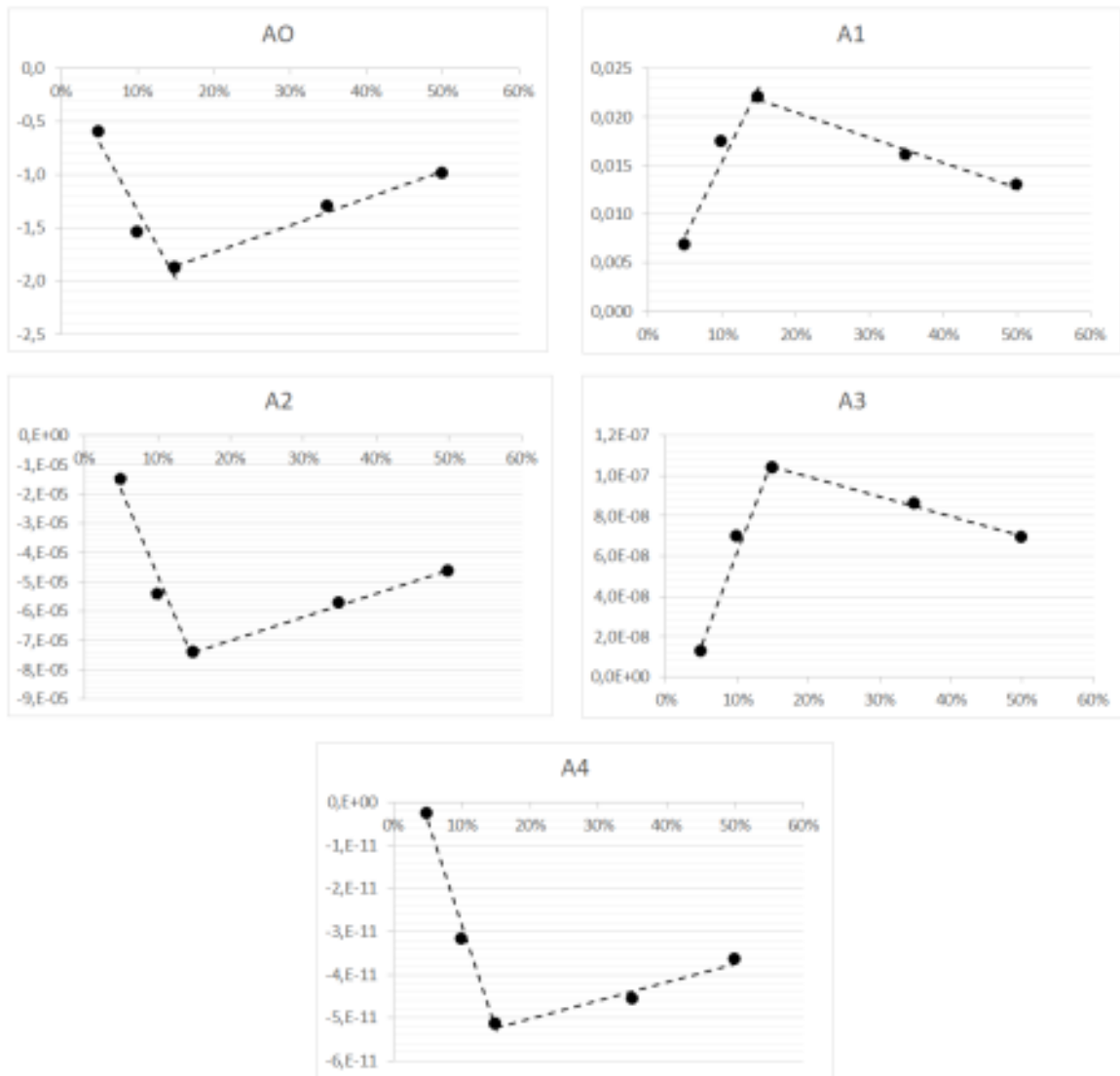


Gráfico 2. Valores de parámetros polinomiales (Fuente: Tesis Vannia Torres y Natalia Cepeda)

Se puede observar en los gráficos, que para cada uno de los parámetros hay cinco pares de parámetros de datos y un cierto porcentaje de cobre, por lo que se pudo encontrar una relación entre ellos.

3.3 Modelo termodinámico

La forma de las ecuaciones polinómicas de orden cuatro es $Y = a + (x \cdot \%Cu) + (x^2 \cdot \%Cu^2) + (x^3 \cdot \%Cu^3) + (x^4 \cdot \%Cu^4)$ siendo % Cu el porcentaje de cobre de 0 a 100.

		x	x2	x3	x4
A0	-0,453834042	-0,029636667	0,000546799	6,34855E-05	-1,17725E-06
A1	0,006542813	1,05425E-05	2,82613E-05	-1,82008E-06	2,42348E-08
A2	-1,96857E-05	9,748647E-07	-1,94748E-07	9,25972E-09	-1,12593E-10
A3	2,92502E-08	-3,54929E-09	4,65446E-10	-1,8703E-11	2,12E-13
A4	-1,58947E-11	2,81232E-12	-3,21975E-13	1,19656E-14	-1,3092E-16

Tabla 5. Ecuaciones polinómicas para cada parámetro (Fuente: Elaboración propia)

		Porcentaje de Cobre			
		x	x2	x3	x4
B0	-0,453834042	-0,029636667	0,000546799	6,34855E-05	-1,17725E-06
B1	0,006542813	1,05425E-05	2,82613E-05	-1,82008E-06	2,42348E-08
B2	-1,96857E-05	9,748647E-07	-1,94748E-07	9,25972E-09	-1,12593E-10
B3	2,92502E-08	-3,54929E-09	4,65446E-10	-1,8703E-11	2,12E-13
B4	-1,58947E-11	2,81232E-12	-3,21975E-13	1,19656E-14	-1,3092E-16

Tabla 6. Parámetros para el cálculo de Cp (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, la ecuación polinomial de Cp es:

$$C_p = A_0 + (A_1 * T) + (A_2 * T^2) + (A_3 * T^3) + (A_4 * T^4)$$

Donde:

Cp = Calor específico

T = Temperatura

Utilizando los parámetros y ecuaciones anteriores se obtienen los valores de Cp experimental.

	Slag 1 al 5 %Cu	Slag 2 al 10 %Cu	Slag 3 al 15 %Cu	Slag 3 al 15 %Cu	slag 4 al 35 %Cu	slag 5 al 50 %Cu
T (°C)	Cp	Cp	Cp	Cp	Cp	Cp
180	0.2073	0.2225	0.2309	0.2378	0.2132	0.2000
300	0.4070	0.4295	0.4329	0.4520	0.3527	0.2925
400	0.4363	0.4159	0.3879	0.3956	0.3241	0.2762
500	0.4073	0.3766	0.3550	0.3459	0.3184	0.2910
600	0.3718	0.3738	0.3957	0.3759	0.3702	0.3511
700	0.3712	0.4012	0.4462	0.4312	0.4088	0.3808
800	0.4364	0.3835	0.3172	0.3305	0.2581	0.2138

Tabla 7. Datos calculados de Cp (Fuente: Tesis Vannia Torres y Natalia Cepeda)

CAPÍTULO IV: INTRODUCCIÓN A RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

“Concentrado de cobre, como una fuente de alto poder eléctrico”

Este trabajo de tesis, muestra el diseño de un nuevo proceso para una planta de alto poder eléctrico, que no utiliza carbón, petróleo, ni madera, sino que utiliza concentrado de cobre como principal fuente energética.

Se utiliza la energía química interna para la producción de un alto poder eléctrico. ¿Cómo se realiza? Es muy simple, lo primero que debes realizar es fundir el concentrado de cobre en un baño de concentrado de cobre, formándose así una reacción exotérmica, mientras más concentrado de cobre se funde, mayor es la energía interna liberada. Esta reacción en cadena puede nunca acabar.

El siguiente paso es recuperar la energía, pero hay un problema. El concentrado de cobre fundido tiene temperaturas muy elevadas que van desde los 1350 °C hasta los 1450°C, por lo que hoy en día no es posible recuperar energía a tan altas temperaturas. Pero, hay una solución, lo primero que se debe realizar es convertir el fundido en granalla, de manera que la temperatura logre bajar hasta unos 800°C aproximadamente, y así será posible recuperar energía, aunque esto produce una cantidad enorme de gases sulfurados, y posiblemente arsénico, bismuto y antimonio dentro del gas que sale del proceso de fundición. Pero esto se realiza a lo largo del mundo.

Existen muchas plantas de fundición de cobre en el planeta, siendo los principales productores China, Rusia, Japón y Chile, pero la parte de recuperación de energía no existe, está desaparecida. Es por esto, que las plantas de fundición de cobre, no son plantas de producción de poder eléctrico.

En este trabajo se muestra cómo la energía puede ser recuperada y cómo la planta de concentrado de fundido puede llegar a ser una planta de alto poder energético.

En la siguiente tabla se puede observar las reacciones de oxidación de fusión de concentrado de cobre.

REACCION	$\Delta H_{298K}^0 \text{ cal/mol}$
$\text{CuFeS}_2(s) + \frac{1}{2}\text{O}_2(g) = \text{CuS}_{0.5} + \text{FeS} + \frac{1}{2}\text{SO}_2(g)$	-22475
$\text{FeS}_2(s) + \text{O}_2(g) = \text{FeS} + \text{SO}_2(g)$	-51350
$\text{CuFeS}_4(s) + \frac{1}{2}\text{O}_2(g) = 5\text{CuS}_{0.5} + \text{FeS} + \frac{1}{2}\text{SO}_2(g)$	-15875
$\text{CuS}(s) + \frac{1}{2}\text{O}_2(g) = \text{CuS}_{0.5} + \frac{1}{2}\text{SO}_2(g)$	-32575
$\text{FeS}(l) + \frac{3}{2}\text{O}_2(g) = \text{FeO} + \text{SO}_2(g)$	-115310
$\text{FeO} + \frac{1}{6}\text{O}_2(g) = \text{FeO}_{1.33}$	-22140
$\text{FeO} + \frac{1}{2}\text{SiO}_2 = \text{Fe}_2\text{SiO}_4$	-4800

Tabla 8. Reacciones de oxidación de fusión de concentrado de cobre (Fuente: Curso pirometalurgia, Universidad de Chile, Otoño 2009)

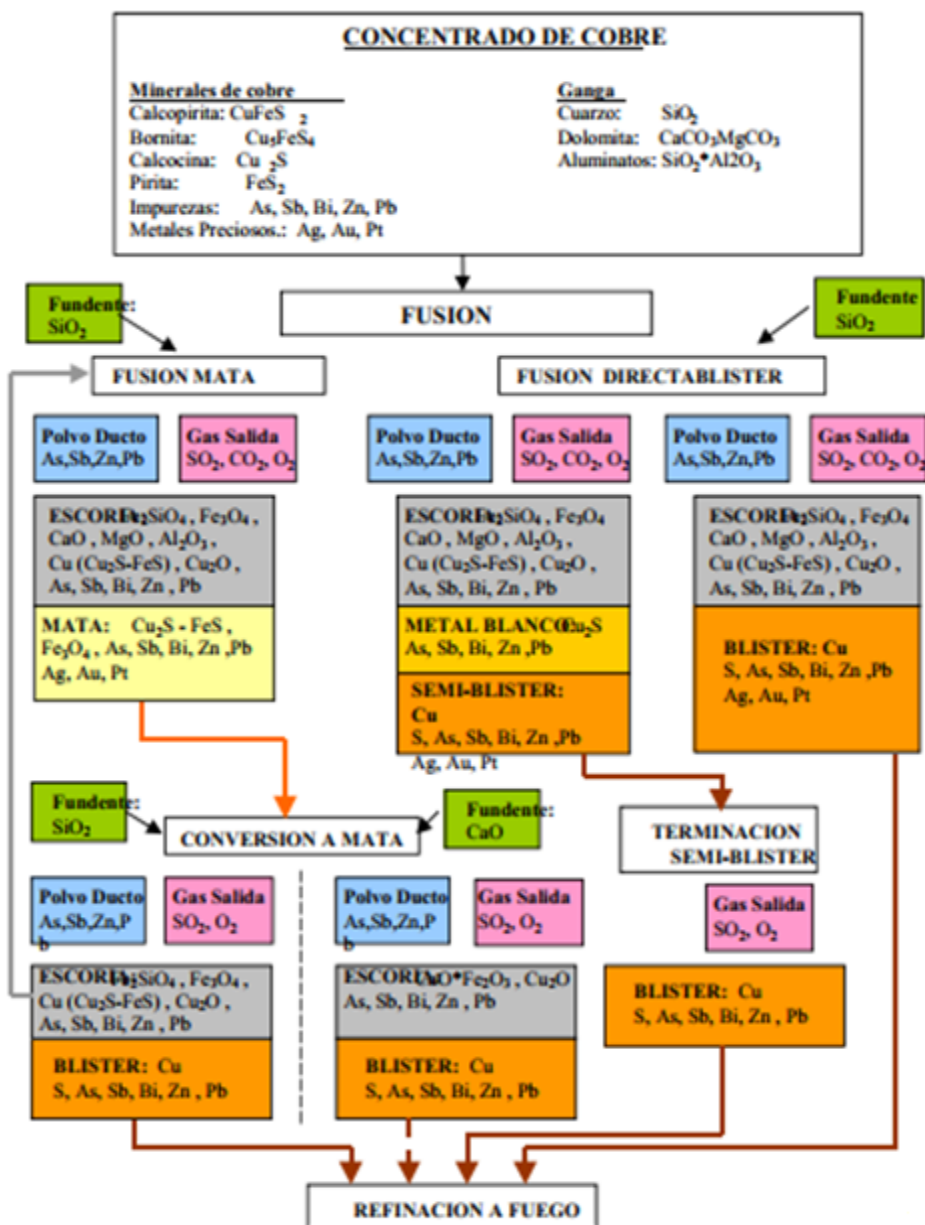


Ilustración 11. Reacciones de concentrado de cobre (Fuente: Curso pirometalurgia, Universidad de Chile, Otoño 2009)

CAPÍTULO V: DESCRIPCIÓN DEL PROCESO PARA LA RECUPERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE ESCORIA GRANALLADA

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, la escoria que se produce en los procesos de fundición es de altas temperaturas, 1350°C , es por eso la necesidad de generar granallas de escorias de cobre, para poder disminuir esta temperatura y llegar hasta aproximadamente 800°C , lo que lo hace más manejable para ser tratado.

El equipo propuesto en esta tesis consiste en un sistema continuo, basado en el ciclo de Carnot.

Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796 – 1832)^[9], fue un físico e ingeniero francés, pionero en el estudio de la termodinámica (física del calor). A la edad de 28 años, publicó su obra maestra: *“Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego y sobre las máquinas adecuadas para desarrollar esta potencia”*, en donde anunció varias ideas que darían forma al segundo principio de la termodinámica, (sobre restricciones a la transferencia de calor y eficiencia en motores térmicos). Desarrolló el ciclo de Carnot, que consiste en una transformación cíclica formado por dos transformaciones isotérmicas (temperatura constante) y dos adiabáticas (calor es igual a cero), demostrando finalmente que ninguna máquina térmica tiene una eficiencia del 100%.

En la siguiente imagen se puede apreciar el esquema propuesto para el equipo generador de electricidad mediante granalla de escoria de cobre.

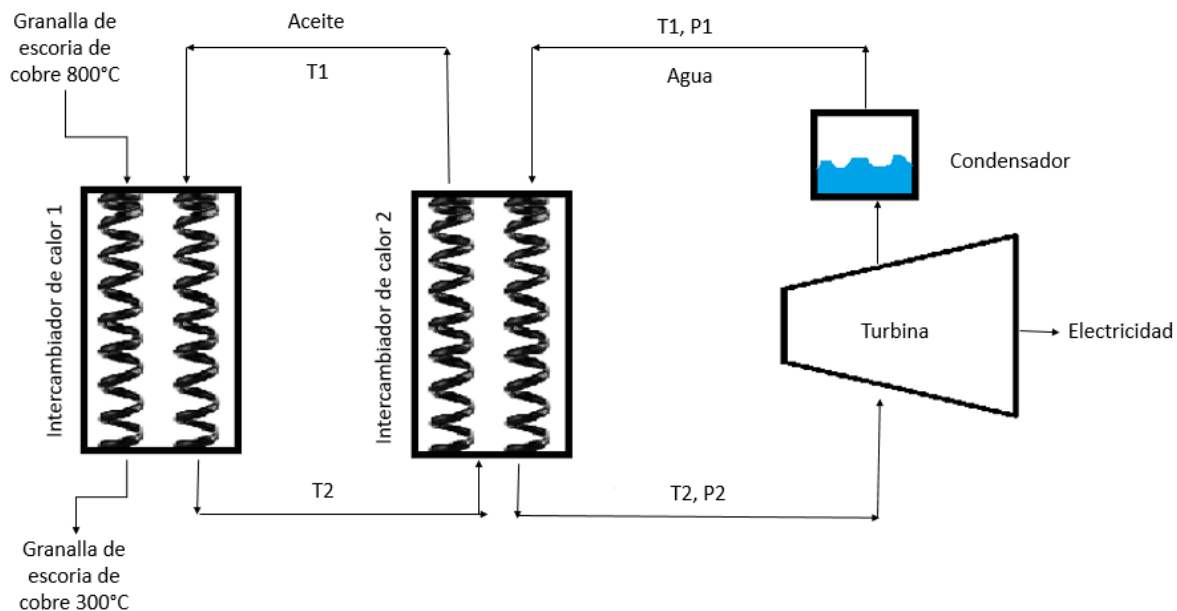


Ilustración 12. Esquema del equipo generador de electricidad mediante granalla de escoria de cobre. (Fuente: Elaboración propia).

La granalla de escoria de cobre entrará a 800°C y saldrá a 300°C . Esta granalla, ingresará al primer circuito, que consta de un intercambiador de calor (1) y aceite resistente a altas temperaturas. Lo que hará que la granalla entregue una cantidad de calor (Q) al aceite y esté pasará de una temperatura 1 a una temperatura 2, y luego pasará al circuito 2.

En el circuito 2, se encuentra otro intercambiador de calor (2) donde se encontrarán fluidos de aceite y agua a un calor (Q) diferente al circuito 1, esto hará que el agua se caliente desde una temperatura 1 a una temperatura 2, y con presión 1, y genere vapor sobrecalentado, para luego pasar al circuito 3 donde se encontrará con la turbina y generará electricidad. El vapor sobrecalentado pierde presión, por lo que sale vapor y agua que pasan a un condensador, el agua (con temperatura 1 y presión 1) que se recupera del condensador vuelve a entrar al circuito 2 y se genera un sistema continuo e interminable que permite generar electricidad.

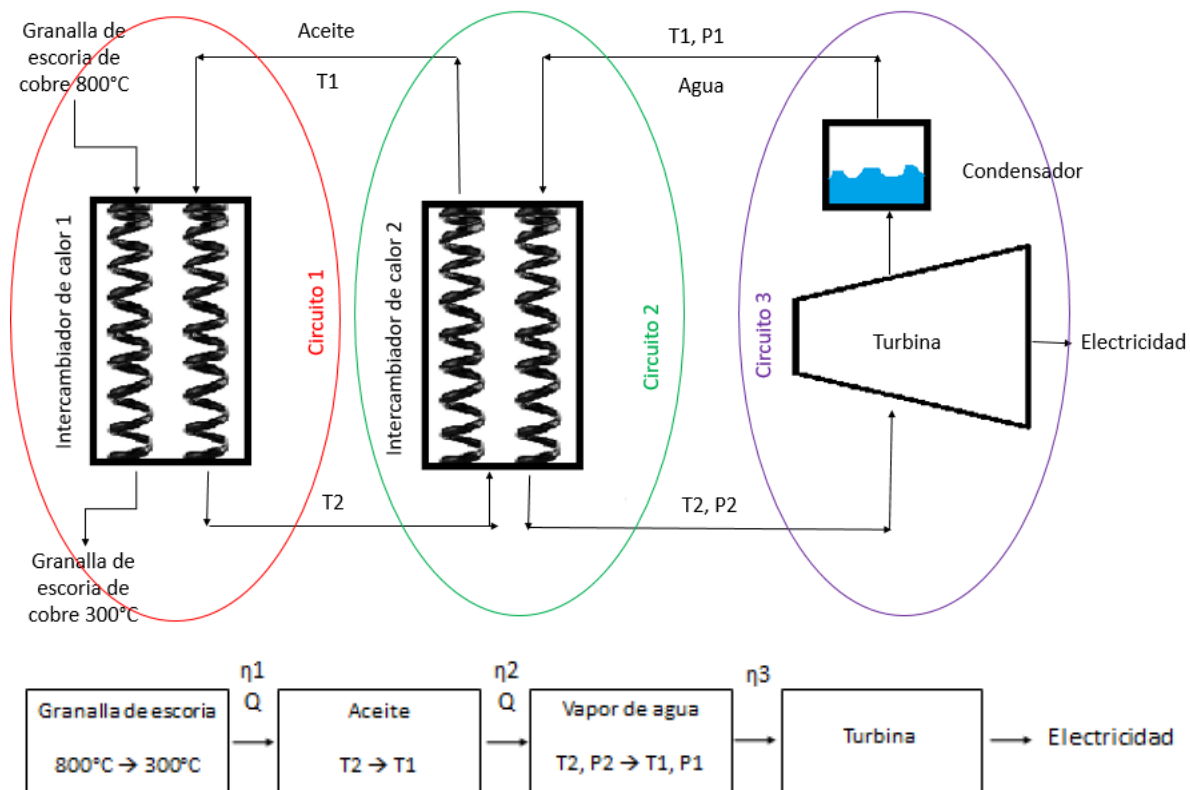


Ilustración 13. Equipo generador de electricidad y sus circuitos. (Fuente: Elaboración propia).

Podemos apreciar en la imagen que cada circuito posee una cierta eficiencia según el equipo que se esté utilizando, ya sea intercambiador de calor o turbina.

CAPÍTULO VI: EVALUACIÓN DE INTERCAMBIO Y RECUPERACIÓN DE ENERGÍA

Como se mencionó en el capítulo anterior, este esquema se basa en parte en el ciclo de Carnot, donde dice que la eficiencia de las máquinas térmicas nunca alcanzará una eficiencia del 100%. Es por esto, que se determinó realizar cálculos con diferentes eficiencias globales (60,70 y 80%).

De acuerdo a los datos obtenidos en producciones de fundiciones en China, donde dice que, por cada 7,7 millones de toneladas de fino de cobre al año, se producen 15,5 millones de toneladas de escoria, se procedió a realizar una comparación con Chile, en cuanto a los millones de toneladas de cobre fino que se producen, lo cual es de 5,5 de la siguiente manera:

$$\frac{5,5 * 15,5 * 1000}{7,7} = 11.071,43 \text{ KTPa}$$

Donde:

KTPa = kilo toneladas por año

Luego,

$$\frac{11.071,43 * 1000}{365 * 24} \approx 1.200 \text{ Ton/hora}$$

Se fijó una base de cálculo de 1 KTPH de flujo de granalla de escoria que ingresa a la máquina.

1 KTPH = 1.000 Ton/hora = 1.000.000.000 gramos/hora

La fórmula para calcular el Cp es:

$$Cp = A0 + A1 * T + A2 * T^2 + A3 * T^3 + A4 * T^4$$

Donde,

Ax = Parámetro

T = Temperatura (200, 300, 400, 500, 600, 700 y 800 °C)

Para calcular el calor Q en calorías se realiza lo siguiente:

$$Q = 1.000.000.000 \text{ (gramos/hora)} * ((Cp_1 + Cp_2) / 2) * (T_1 - T_2)$$

Una vez obtenidos los resultados de calor específico de las granallas de escoria con diferentes porcentajes de cobre, se procedió a realizar los siguientes cálculos.

6.1 Cálculos para 5% de Cu


5%			Temperatura	Cp	Q(cal)
A0	-0,58114749		200	0,24700042	30801685525
A1	0,0070897		300	0,369033291	38595413690
A2	-1,8593E-05		400	0,402874983	40293598552
A3	2,0935E-08		500	0,402996988	40327162437
A4	-8,4686E-12		600	0,403546261	41094574253
			700	0,418345224	42961849490
			800	0,440891766	

Tabla 9. Valores de parámetros, Cp y Q (cal) para 5% de Cu. (Fuente: Elaboración propia).

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	80	234074283,9	217295315,8	201719101,6	187259425,3	217,9568858
800	300	80	203272598,4	188701564	175175013,9	162618077,1	189,2760784
800	400	80	164677184,7	152872755,9	141914494,9	131741746,5	153,3381871
800	500	80	124383586,2	115467492,6	107190524,5	99506867,97	115,819041
800	600	80	84056423,74	78031071,31	72437629,62	67245138,34	78,26864207
800	700	80	42961849,49	39882248,04	37023399,31	34369479,26	40,00367218

800	200	80	234074283,9	217295315,8	201719101,6	187259425,3	217,9568858
700	200	80	191112434,5	177413067,8	164695702,3	152889946,1	177,9532136
600	200	80	150017860,2	139264244,5	129281472	120014287	139,6882437
500	200	80	109690697,8	101827823,2	94528577,16	87752557,35	102,1378448
400	200	80	69397099,21	64422559,95	59804606,78	55517678,83	64,61869869
300	200	80	30801685,52	28593751,82	26544087,75	24641348,18	28,68080739

Tabla 10. MW producidos con eficiencia 80% (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	70	234074283,9	207835509,7	184537995,2	163852037,3	190,7123218
800	300	70	203272598,4	180486567,7	160254758,3	142290852,4	165,6166091
800	400	70	164677184,7	146217542,8	129827151,5	115274056,4	134,1709466
800	500	70	124383586,2	110440692,6	98060740,58	87068530,8	101,3416857
800	600	70	84056423,74	74634040,86	66267868,74	58839510,46	68,48507858
800	700	70	42961849,49	38146001,07	33869989,66	30073301,71	35,00322173

800	200	70	234074283,9	207835509,7	184537995,2	163852037,3	190,7123218
700	200	70	191112434,5	169689508,6	150668005,6	133778735,6	155,7091
600	200	70	150017860,2	133201468,8	118270126,5	105012526,8	122,2272432
500	200	70	109690697,8	97394817,13	86477254,66	76783506,49	89,37063608
400	200	70	69397099,21	61617966,93	54710843,71	48577980,87	56,5413752
300	200	70	30801685,52	27348941,98	24283236,93	21561184,94	25,09571261

Tabla 11. MW producidos con eficiencia 70% (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	60	234074283,9	197425932,5	166515510,3	140444645,8	163,4677538
800	300	60	203272598,4	171446780,2	144603840,7	121963624,6	141,9571364
800	400	60	164677184,7	138894141,7	117147877,1	98806363,93	115,0037032
800	500	60	124383586,2	104909198,4	88483860,67	74630191,81	86,86432826
800	600	60	84056423,74	70895946,21	59795967,58	50433881,35	58,70151367
800	700	60	42961849,49	36235433,71	30562153,91	25777123,55	30,00277055

800	200	60	234074283,9	197425932,5	166515510,3	140444645,8	163,4677538
700	200	60	191112434,5	161190498,8	135953356,4	114667522,3	133,4649832
600	200	60	150017860,2	126529986,3	106719542,7	90010764,49	104,7662401
500	200	60	109690697,8	92516734,15	78031649,64	65814454,02	76,6034255
400	200	60	69397099,21	58531790,84	49367633,19	41638281,9	48,46405054
300	200	60	30801685,52	25979152,37	21911669,65	18481021,25	21,51061731

Tabla 12. MW producidos con eficiencia 60% (Fuente: Elaboración propia)

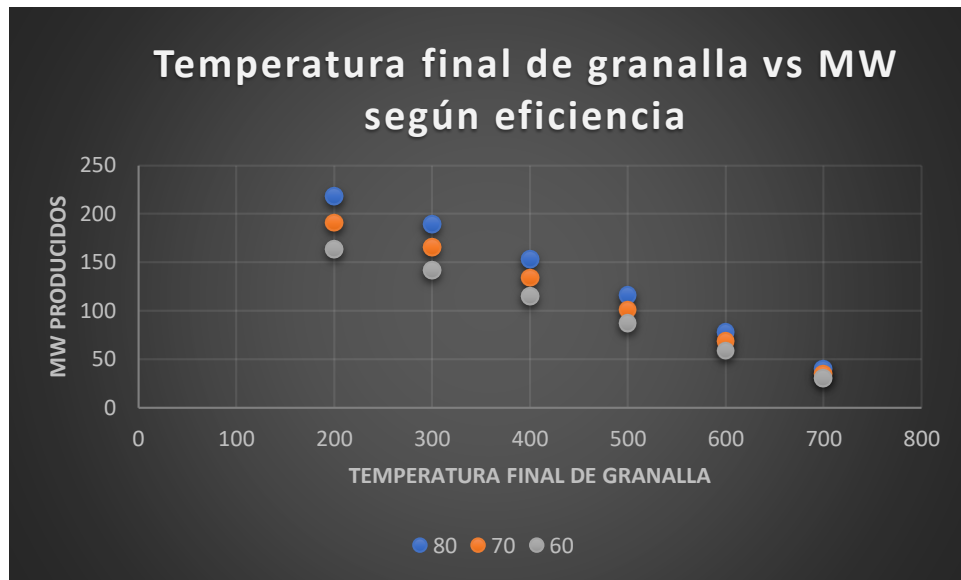


Gráfico 3. Temperatura final de granalla vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia).

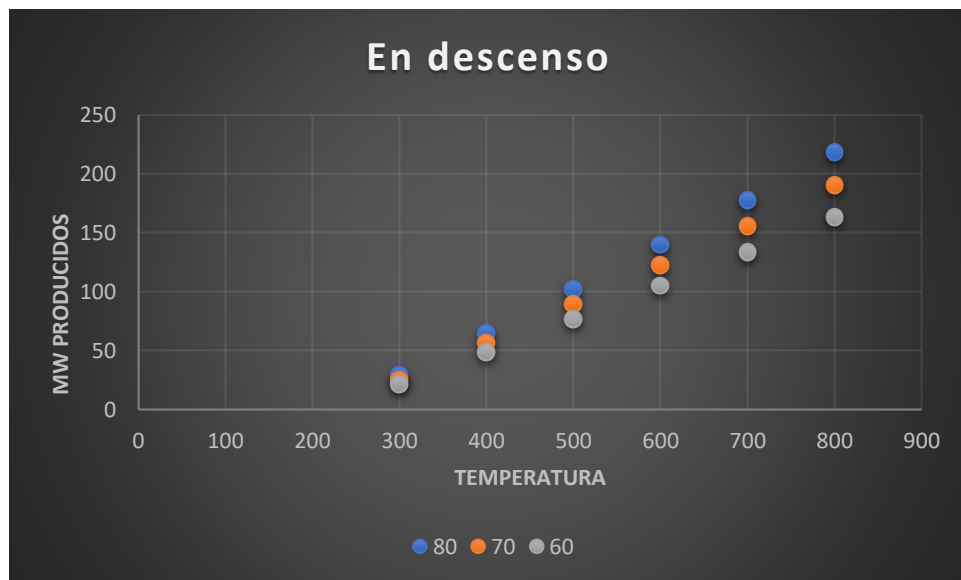


Gráfico 4. Temperatura final 200°C vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia).

6.2 Cálculos para 10% de Cu


10%			Temperatura	Cp	Q(cal)
A0	-0,6438078		200	0,259252079	31719807251
A1	0,00789665		300	0,375144066	38256130298
A2	-2,1278E-05		400	0,38997854	37891109889
A3	2,3725E-08		500	0,367843658	35916054596
A4	-9,3126E-12		600	0,350477434	35387258389
			700	0,357267734	37126000628
			800	0,385252279	

Tabla 13. Valores de parámetros, Cp y Q (cal) para 10% de Cu (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	80	216296361,1	200791754,2	186398552,2	173037087,1	201,403078
800	300	80	184576553,8	171345693,7	159063251,2	147661241,6	171,8673669
800	400	80	146320423,5	135831848,3	126095117,7	117056337,7	136,2453974
800	500	80	108429313,6	100656857,9	93441549,26	86743450,04	100,9633144
800	600	80	72513259,02	67315346,45	62490031,88	58010606,65	67,52029247
800	700	80	37126000,63	34464725,88	31994217,25	29700800,21	34,56965601
800	200	80	216296361,1	200791754,2	186398552,2	173037087,1	201,403078
700	200	80	179170360,4	166327028,3	154404335	143336286,9	166,8334219
600	200	80	143783102	133476407,7	123908520,3	115026480,5	133,8827855
500	200	80	107867047,4	100134896,3	92957002,96	86293637,11	100,4397636
400	200	80	69975937,55	64959905,86	60303434,54	55980749,49	65,15768059
300	200	80	31719807,25	29446060,53	27335301,06	25375845,55	29,53571101

Tabla 14. MW producidos con eficiencia 80% (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	70	216296361,1	192050419,6	170522349,5	151407488,3	176,2277364
800	300	70	184576553,8	163886273,6	145515289,6	129203618	150,3839829
800	400	70	146320423,5	129918499,7	115355164,9	102424320,5	119,2147519
800	500	70	108429313,6	96274829,01	85482812,64	75900537,38	88,34292173
800	600	70	72513259,02	64384817,91	57167541,95	50759293,25	59,08027038
800	700	70	37126000,63	32964327,11	29269160,25	25988206,55	30,24845642
800	200	70	216296361,1	192050419,6	170522349,5	151407488,3	176,2277364
700	200	70	179170360,4	159086092,5	141253189,2	125419281,8	145,97928
600	200	70	143783102	127665601,7	113354807,5	100648195,1	117,147466
500	200	70	107867047,4	95775590,58	85039536,81	75506950,96	87,88481464
400	200	70	69975937,55	62131919,85	55167184,59	48983167,8	57,01298448
300	200	70	31719807,25	28164146	25007059,9	22203870,3	25,84375346

Tabla 15. MW producidos con eficiencia 70% (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	60	216296361,1	182431449	153868670,8	129777886,4	151,0523911
800	300	60	184576553,8	155677922,6	131303868,7	110745991,8	128,9005957
800	400	60	146320423,5	123411446,9	104089264,2	87792301,28	102,1841039
800	500	60	108429313,6	91452841,36	77134327,55	65057623,13	75,72252722
800	600	60	72513259,02	61160062,28	51584403,58	43507978,79	50,64024706
800	700	60	37126000,63	31313287,27	26410654,07	22275612,35	25,9272562
800	200	60	216296361,1	182431449	153868670,8	129777886,4	151,0523911
700	200	60	179170360,4	151118161,7	127458016,7	107502274	125,1251349
600	200	60	143783102	121271386,7	102284267,2	86269907,58	100,4121441
500	200	60	107867047,4	90978607,61	76734343,25	64720263,24	75,32986389
400	200	60	69975937,55	59020002,09	49779406,58	41985585,09	48,86828718
300	200	60	31719807,25	26753526,36	22564802,09	19031894,58	22,15179538

Tabla 16. MW producidos con eficiencia 60% (Fuente: Elaboración propia)

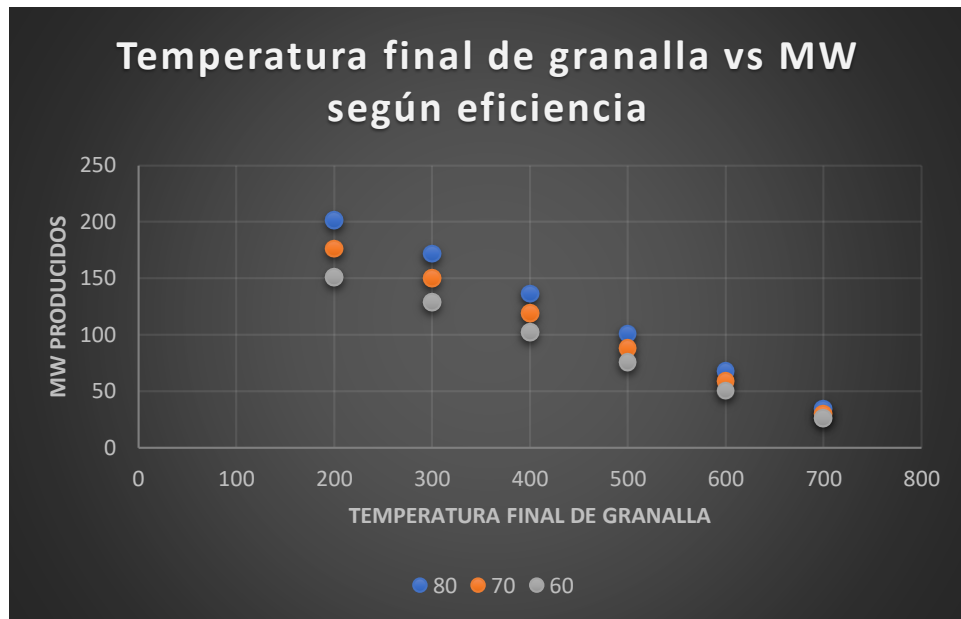


Gráfico 5. Temperatura final de granalla vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)

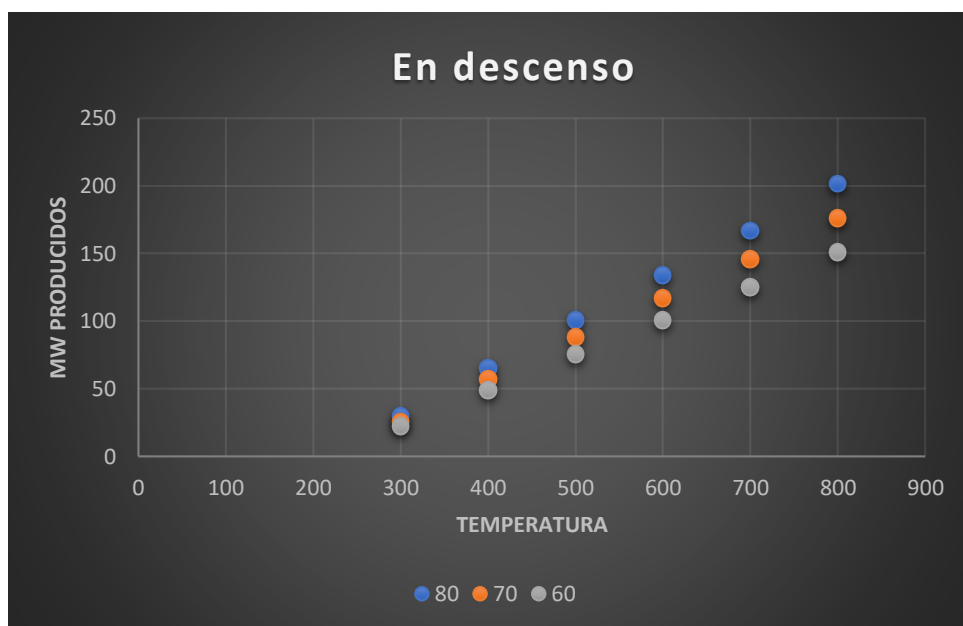


Gráfico 6. Temperatura final 200°C vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia)

6.3 Cálculos para 15% de Cu

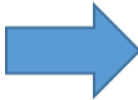
15%			Temperatura	Cp	Q(cal)
A0	-0,62068904		200	0,281843449	33479650074
A1	0,00814389		300	0,387749552	39433356657
A2	-2,3329E-05		400	0,400917581	39409851848
A3	2,8346E-08		500	0,387279456	38514544231
A4	-1,2398E-11		600	0,383011428	38877275033
			700	0,394534072	39652318128
			800	0,39851229	

Tabla 17. Valores de parámetros, Cp y Q (cal) para 15% de Cu (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	80	229366996	212925456,8	197662483,9	183493595	213,5737224
800	300	80	195887345,9	181845702,9	168810596,2	156709875,2	182,3993441
800	400	80	156453989,2	145239017,4	134827959,8	125163190,2	145,6812072
800	500	80	117044137,4	108654151,9	100865579,3	93635309	108,9849566
800	600	80	78529593,16	72900416,31	67674751,44	62823673,91	73,12236644
800	700	80	39652318,13	36809951,29	34171331,66	31721854,19	36,92202162

800	200	80	229366996	212925456,8	197662483,9	183493595	213,5737224
700	200	80	189714677,8	176115505,5	163491152,2	151771740,8	176,6517008
600	200	80	150837402,8	140025040,5	129987732,4	120669921,1	140,4513559
500	200	80	112322858,6	104271304,9	96796904,57	89858285,98	104,5887658
400	200	80	72913006,73	67686439,35	62834524,01	58330404,81	67,89251519
300	200	80	33479650,07	31079753,89	28851887,62	26783719,8	31,17437825

Tabla 18. MW producidos con eficiencia 80% (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	70	229366996	203655889,6	180826893,5	160556934,9	186,8770529
800	300	70	195887345,9	173929171,9	154432419,9	137121174,4	159,5994652
800	400	70	156453989,2	138916134	123344201	109517818,2	127,4710875
800	500	70	117044137,4	103923966,1	92274512,63	81930915,44	95,3618604
800	600	70	78529593,16	69726745,49	61910661,2	54970728,14	63,98208631
800	700	70	39652318,13	35207454,7	31260842,37	27756629,22	32,30677683

800	200	70	229366996	203655889,6	180826893,5	160556934,9	186,8770529
700	200	70	189714677,8	168448434,8	149566051,1	132800305,7	154,570276
600	200	70	150837402,8	133929144,1	118916232,3	105586206,8	122,8949666
500	200	70	112322858,6	99731923,44	88552380,86	78626019,49	91,51519246
400	200	70	72913006,73	64739755,53	57482692,51	51039116,71	59,40596534
300	200	70	33479650,07	29726717,61	26394473,59	23435760,56	27,27758765

Tabla 19. MW producidos con eficiencia 70% (Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	60	229366996	193455651,4	163166844,9	137620271,5	160,1803794
800	300	60	195887345,9	165217815,8	139350127,7	117532470,7	136,799583
800	400	60	156453989,2	131958428,8	111298069,2	93872443,99	109,2609652
800	500	60	117044137,4	98718866,44	83262731,55	70226520,17	81,73876219
800	600	60	78529593,16	66234435,93	55864296,84	47117781,22	54,84180484
800	700	60	39652318,13	33444066,35	28207823,08	23791403,66	27,69153137

800	200	60	229366996	193455651,4	163166844,9	137620271,5	160,1803794
700	200	60	189714677,8	160011585	134959021,8	113828867,9	132,4888481
600	200	60	150837402,8	127221215,5	107302548,1	90502490,32	105,3385746
500	200	60	112322858,6	94736784,95	79904113,35	67393751,36	78,44161724
400	200	60	72913006,73	61497222,62	51868775,67	43747827,55	50,91941425
300	200	60	33479650,07	28237835,55	23816717,17	20087800,84	23,38079648

Tabla 20. MW producidos con eficiencia 60% (Fuente: Elaboración propia)

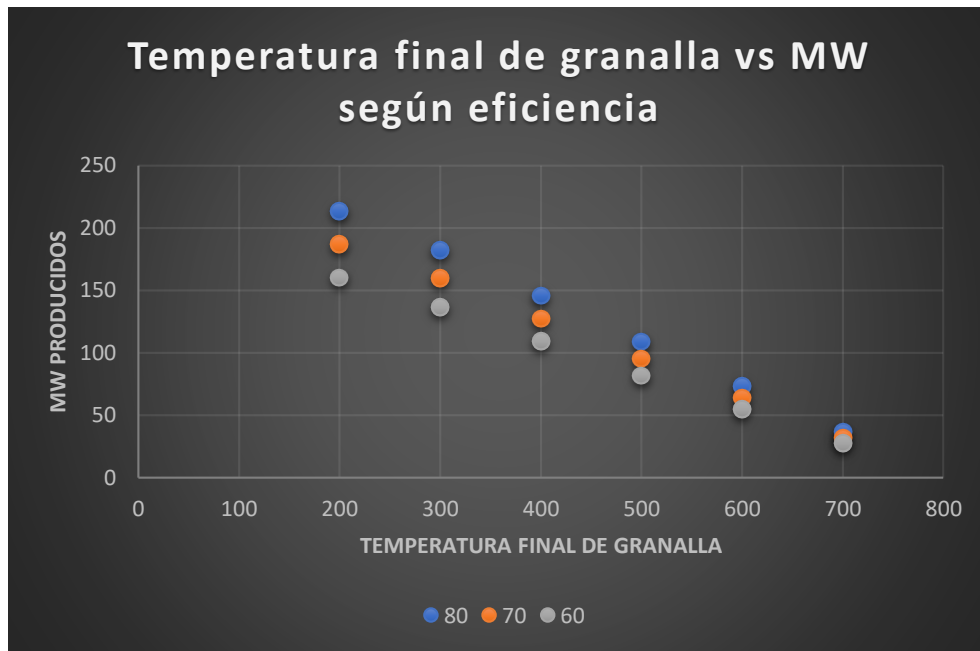


Gráfico 7. Temperatura final de granalla vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia).

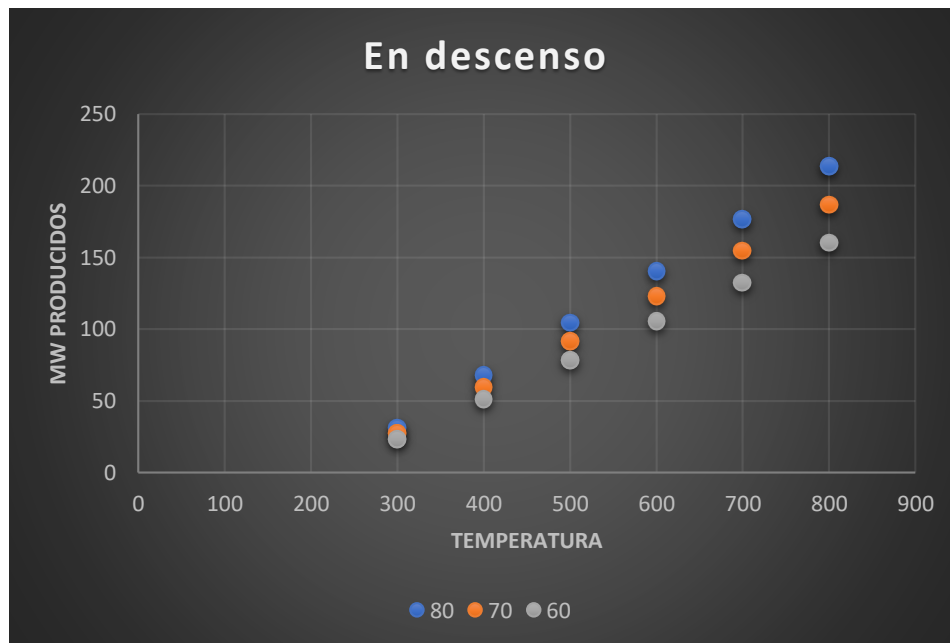


Gráfico 8. Temperatura final de 200°C vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia).

6.4 Cálculos para 35% de Cu


35%			Temperatura	Cp	Q(cal)
A0	0,13403815		200	0,207731104	23895956189
A1	-0,00013646		300	0,27018802	29516155470
A2	3,9194E-06		400	0,320135089	33477936169
A3	-7,9096E-09		500	0,349423634	35527987455
A4	4,6796E-12		600	0,361136115	36536112552
			700	0,369586136	38495228739
			800	0,400318439	

Tabla 21. Valores de parámetros, Cp y Q (cal) para 35% de Cu (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	80	197449376,6	183295763,7	170156713,5	157959499,7	183,8538198
800	300	80	173553420,4	161112723,1	149563802,8	138842734,9	161,6032414
800	400	80	144037264,9	133712351,7	124127551,3	115229810,8	134,1194477
800	500	80	110559328,7	102634188,8	95277140,64	88447462,13	102,9466654
800	600	80	75031341,29	69652926,95	64660049,39	60025072,45	69,86498989
800	700	80	38495228,74	35735804,66	33174182,26	30796182,69	35,84460467

800	200	80	197449376,6	183295763,7	170156713,5	157959499,7	183,8538198
700	200	80	158954147,8	147559959	136982531,2	127163317	148,0092151
600	200	80	122418035,3	113642836,7	105496664,1	97934427,27	113,9888299
500	200	80	86890047,83	80661574,89	74879572,82	69512037,58	80,90715438
400	200	80	53412111,66	49583412,05	46029162,19	42729688,91	49,73437203
300	200	80	23895956,19	22183040,61	20592910,65	19116764,76	22,25057834

Tabla 22. MW producidos con eficiencia 80% (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	70	197449376,6	175316105,3	155663883,7	138214596,1	160,8721317
800	300	70	173553420,4	154098788,6	136824941,7	121487422,8	141,4028709
800	400	70	144037264,9	127891273,9	113555182,8	100826109,1	117,3545455
800	500	70	110559328,7	98166078,12	87162060,43	77391548,32	90,07835428
800	600	70	75031341,29	66620633,41	59152731,64	52521951,25	61,13188113
800	700	70	38495228,74	34180070,32	30348623,6	26946666,45	31,36403677

800	200	70	197449376,6	175316105,3	155663883,7	138214596,1	160,8721317
700	200	70	158954147,8	141136035	125315260,1	111267929,6	129,5080949
600	200	70	122418035,3	108695471,9	96511152,07	85692644,85	99,74025057
500	200	70	86890047,83	77150027,23	68501823,28	60823047,78	70,79377743
400	200	70	53412111,66	47424831,4	42108700,88	37388486,95	43,51758618
300	200	70	23895956,19	21217316,79	18838941,96	16727173,27	19,46926082

Tabla 23. MW producidos con eficiencia 70% (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	60	197449376,6	166535283,8	140461323,4	118469689,6	137,8904403
800	300	60	173553420,4	146380650,1	123462244	104132108,2	121,2024974
800	400	60	144037264,9	121485756	102465073,3	86422405,39	100,5896408
800	500	60	110559328,7	93249366,02	78649575,41	66335632,89	77,21004129
800	600	60	75031341,29	63283895,5	53375714,21	45018828,97	52,39877109
800	700	60	38495228,74	32468139,19	27384694,08	23097149,65	26,88346821

800	200	60	197449376,6	166535283,8	140461323,4	118469689,6	137,8904403
700	200	60	158954147,8	134067144,6	113076629,3	95372539,95	111,0069721
600	200	60	122418035,3	103251388,3	87085609,21	73450860,64	85,49166918
500	200	60	86890047,83	73285917,75	61811748,01	52134056,71	60,68039899
400	200	60	53412111,66	45049527,77	37996250,08	32047284,22	37,30079943
300	200	60	23895956,19	20154633,63	16999079,4	14337581,42	16,68794289

Tabla 24. MW producidos con eficiencia 60% (Fuente: Elaboración propia)

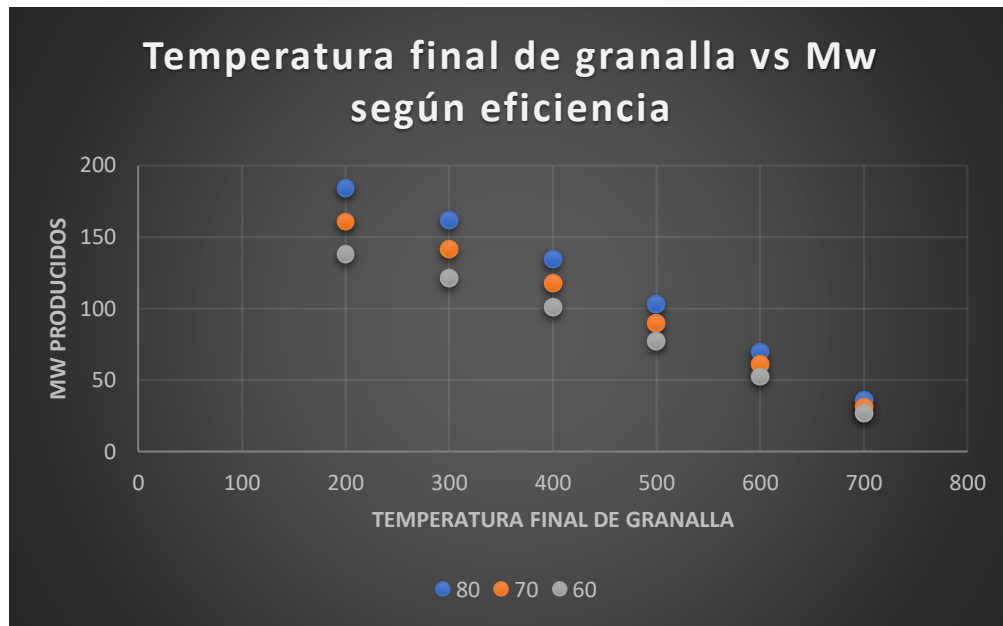


Gráfico 9. Temperatura final de granalla vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia).

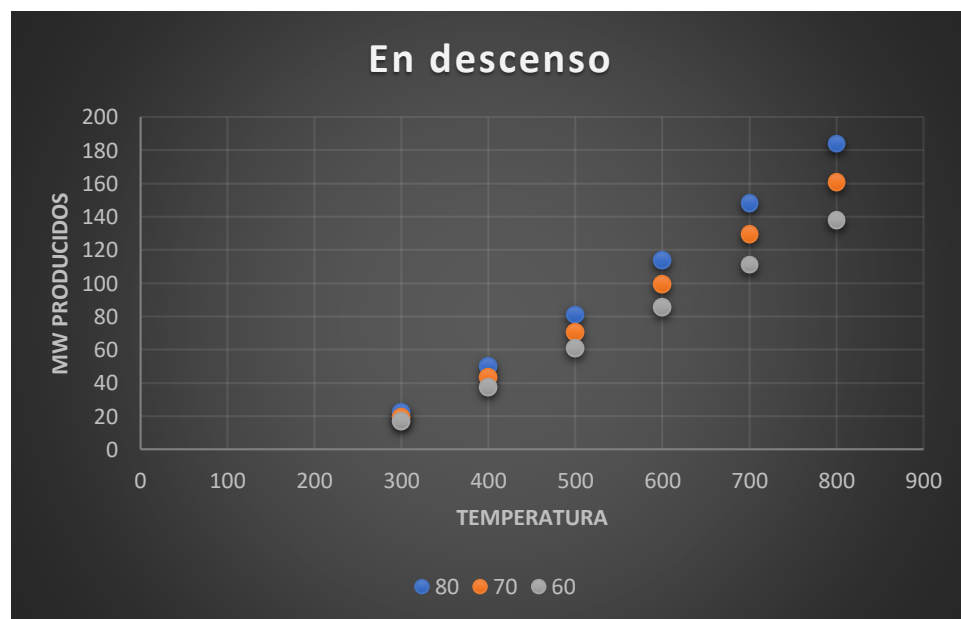


Gráfico 10. Temperatura final de 200°C vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia).

6.5 Cálculos para 50% de Cu

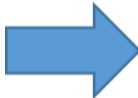
50%			Temperatura	Cp	Q(cal)
A0	0,00919068		200	0,220982222	24468806428
A1	0,0016813		300	0,268393907	28367168214
A2	-4,0526E-06		400	0,298949457	30994624350
A3	5,2584E-09		500	0,32094303	32848359244
A4	-2,7686E-12		600	0,336024155	33761094637
			700	0,339197738	32901089596
			800	0,318824054	

Tabla 25. Valores de parámetros, Cp y Q (cal) para 50% de Cu (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	80	183341142,5	170198839,4	157998605,9	146672912,5	170,717021
800	300	80	158872336	147484011,7	136912027,9	127097867,6	147,9330365
800	400	80	130505167,8	121150265,5	112465943,6	104404133,2	121,5191155
800	500	80	99510543,48	92377405,18	85755586,2	79608434	92,6586543
800	600	80	66662184,23	61883689,79	57447728,51	53329746,86	62,07209877
800	700	80	32901089,6	30542665,92	28353299,32	26320871,42	30,63565508

800	200	80	183341142,5	170198839,4	157998605,9	146672912,5	170,717021
700	200	80	150440052,9	139656173,5	129645306,6	120352041,1	140,0813659
600	200	80	116678958,2	108315149,6	100550877,4	93343165,68	108,6449222
500	200	80	83830598,99	77821434,18	72243019,75	67064478,54	78,05836669
400	200	80	52835974,64	49048573,82	45532662,36	42268779,3	49,19790545
300	200	80	24468806,43	22714827,66	21086578,02	19575044,95	22,78398446

Tabla 26. MW producidos con eficiencia 80% (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	70	183341142,5	162789346,8	144541323,8	128338829,9	149,37743
800	300	70	158872336	141063394	125250761,8	111210661,4	129,4414387
800	400	70	130505167,8	115876069,8	102886834,2	91353638,96	106,3292521
800	500	70	99510543,48	88355816,69	78451489,37	69657396,81	81,07634237
800	600	70	66662184,23	59189624,78	52554708,83	46663539,94	54,31309973
800	700	70	32901089,6	29213011,4	25938351,76	23030768,13	26,80620476

800	200	70	183341142,5	162789346,8	144541323,8	128338829,9	149,37743
700	200	70	150440052,9	133576335,4	118602972,1	105308061,8	122,5712252
600	200	70	116678958,2	103599722,1	91986615	81675289,97	95,06433022
500	200	70	83830598,99	74433530,15	66089834,46	58681433,09	68,30108758
400	200	70	52835974,64	46913277	41654489,65	36985190,95	43,04817781
300	200	70	24468806,43	21725952,85	19290561,99	17128168,53	19,93599128

Tabla 27. MW producidos con eficiencia 70% (Fuente: Elaboración propia)

T° Entrada	T° Salida	Eficiencia	Inicio (Kcal/hora)	Aceite (Kcal/hora)	Vapor de agua (Kcal/hora)	Turbina (Kcal/hora)	Turbina (MW)
800	200	60	183341142,5	154635936,1	130425023,1	110004744,6	128,0378358
800	300	60	158872336	133998141,8	113018430,2	95323452,85	110,9498381
800	400	60	130505167,8	110072341,3	92838624,79	78303142,77	91,13938652
800	500	60	99510543,48	83930457,94	70789702,52	59706358,17	69,49402875
800	600	60	66662184,23	56225073,79	47422072,34	39997332,03	46,55409955
800	700	60	32901089,6	27749858,66	23405141,44	19740664,37	22,97675388

800	200	60	183341142,5	154635936,1	130425023,1	110004744,6	128,0378358
700	200	60	150440052,9	126886077,5	107019881,7	90264080,23	105,0610819
600	200	60	116678958,2	98410862,36	83002950,8	70007412,56	81,48373624
500	200	60	83830598,99	70705478,21	59635320,62	50298386,42	58,54380704
400	200	60	52835974,64	44563594,9	37586398,35	31701601,82	36,89844927
300	200	60	24468806,43	20637794,32	17406592,99	14681291,75	17,08799769

Tabla 28. MW producidos con eficiencia 60% (Fuente: Elaboración propia)

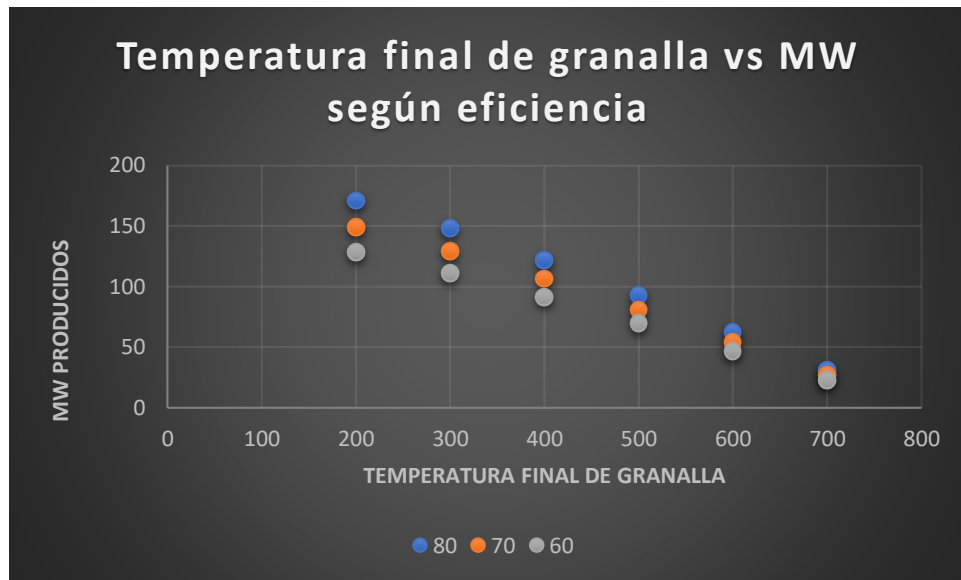


Gráfico 11. Temperatura final de granalla vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia).

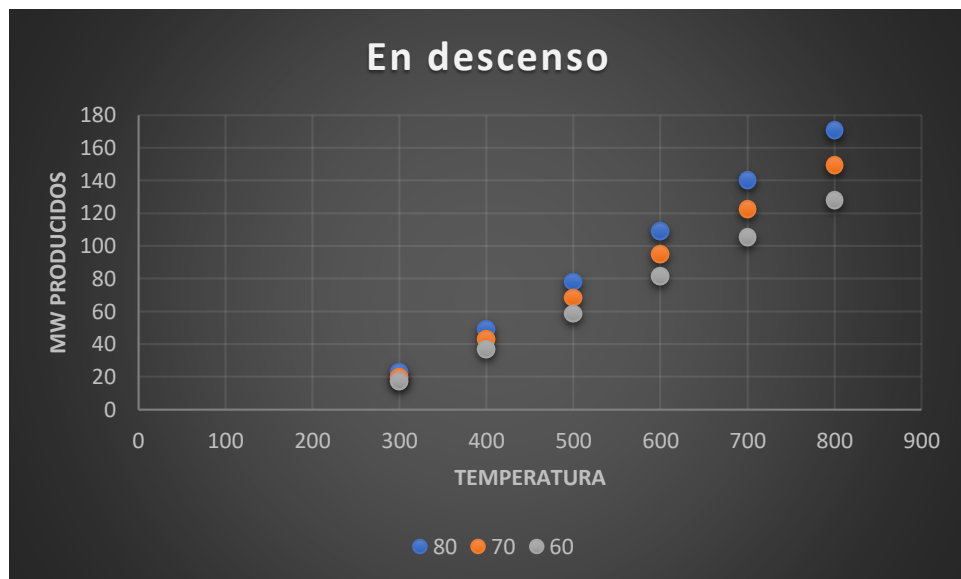


Gráfico 12. Temperatura final de 200°C vs MW producidos según eficiencia. (Fuente: Elaboración propia).

CAPÍTULO VII: PLANTAS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA

7.1 Planta hidroeléctrica

La hidroelectricidad es la fuente de energía renovable más utilizada en el mundo, con un 71% de la generación de energía renovable en el año 2016. Para ese año, se contaba con una capacidad instalada de 1.064 GW, generando un 16,4% del total de electricidad en el mundo.

Esta energía se basa en el principio de la conservación de la energía, donde se aprovecha la energía potencial del agua cuando se encuentra a una altura superior respecto a un punto de descarga^[10].

Al ser una energía proveniente del agua, se considera como fuente limpia, al no emitir contaminantes como aquellas que queman combustibles. Además, es una energía local, lo que permite la independencia de energía importada.

Esta energía es un complemento para las energías intermitentes como son la solar o eólica, ya que regularmente tiene respuestas rápidas y es flexible, lo que permite una incorporación mayor de estas fuentes a la red y otorgan seguridad al suministro.

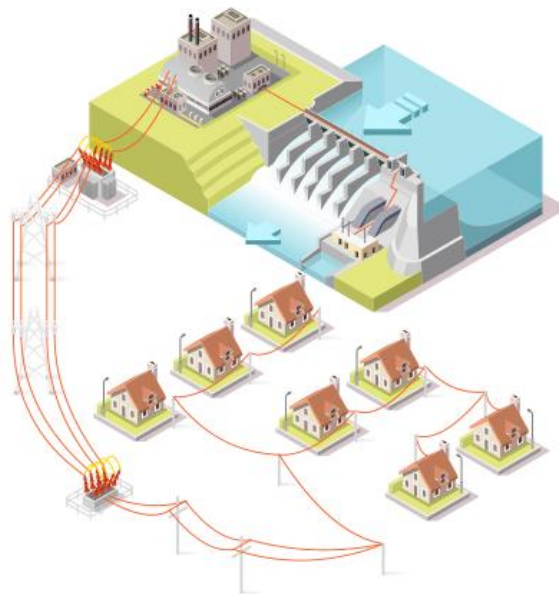


Ilustración 14. Planta hidroeléctrica. (Fuente: www.generadoras.cl)

7.1.1 Potencial hidroeléctrico de Chile

La siguiente tabla muestra la capacidad instalada hidroeléctrica, alcanzando una participación total de un 29%.

	Hidráulica de pasada (MW)	Hidráulica de embalse (MW)	Total Hidroeléctrico (MW)	Total (MW)	Participación energía hidroeléctrica (%)
SEN	3.227	3.393	6.621	22.369	30
SEA	23	0	23	62	37
SEM	0	0	0	104	0
Total	3.250	3.393	6.643	22.974	29

Tabla 29. Participación energía eléctrica. (Fuente: [www.](#))

Según el estudio de cuentas del Ministerio de Energía, existe un potencial hidroeléctrico en Chile de 15.938 MW, donde el mayor potencial se encuentra en la cuenca del Biobío con 18%, Baker con 12%, Palena y Pascua con 11% cada una, y por último Puelo con un 3% ^[11].

Cuenca	Potencial hidroeléctrico (MW)	Proporción
Biobío	2.902	18%
Baker	1.918	12%
Palena	1.797	11%
Pascua	1.694	11%
Yelcho	1.403	9%
Maule	1.368	9%
Toltén	1.123	7%
Valdivia	906	6%
Aysén	848	5%
Bueno	807	5%
Cisnes	619	4%
Puelo	552	3%
Total	15.937	100%

Tabla 30. Cuencas y su potencial hidroeléctrico. (Fuente: Ministerio de Energía, Estudio de Cuencas, 2016.)

7.1.2 Tipos de centrales hidroeléctricas

- Centrales de embalse
- Centrales reversibles (pumped storage)
- Centrales de pasada

7.1.3 Centrales hidroeléctricas que son parte de generadoras de Chile

- AES Gener: 5 centrales hidráulicas
- Orazul: 2 centrales hidráulicas
- Engie: 2 centrales hidráulicas
- Colbún: 18 centrales hidráulicas
- Enel: 19 centrales hidráulicas
- PacificHydro: 3 centrales hidráulicas
- Statkraft: 3 centrales hidráulicas

7.2 Planta Solar

Las centrales solares son aquellas instalaciones destinadas a generar energía eléctrica mediante la radiación del sol ^[12].

El principal factor para determinar el lugar de instalación es la cantidad de energía solar que incide por unidad de área y tiempo (kWh/ m² al día). La mayor incidencia solar del mundo, se encuentra en la zona norte de nuestro país, específicamente en el desierto de Atacama y alrededores.

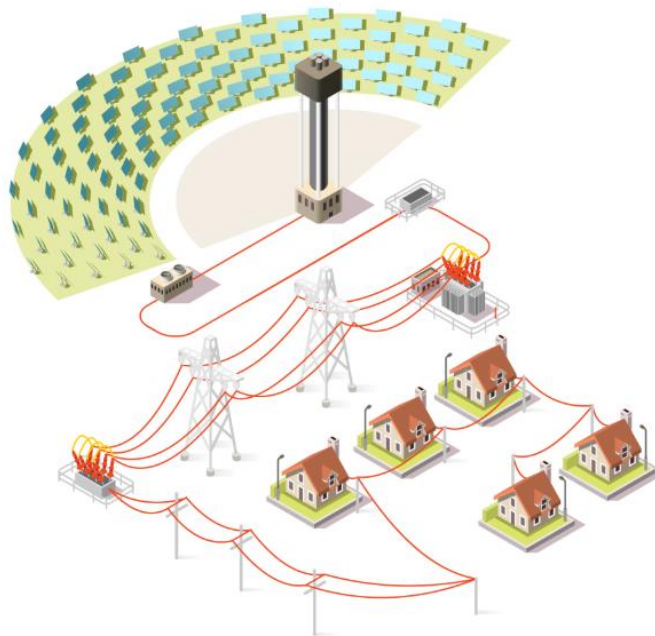


Ilustración 15. Planta solar. (Fuente: www.generadoras.cl)

7.2.1 Capacidad instalada de energía solar

Durante los últimos años, la capacidad de instalación ha aumentado considerablemente, debido a la disminución de los costos en esta tecnología. En el mundo^[13] para el año 2010 existían 250 GW de instalaciones solares, mientras que para el año 2015 esta cifra aumentó alcanzando los 430 GW. En Chile para diciembre del 2017 se instalaron 1.769 MW de tecnologías solares, lo que logró un incremento del 8% del sistema, como se detalla en la tabla a continuación.

	Solar (MW)	Total (MW)	Participación de energía solar (%)
SEN	1.802	22.369	8
SEA	0	62	0
SEM	0	104	0
Total	1.802	22.535	8

Tabla 31. Planta solar y su participación. (Fuente: www.generadoras.cl)

7.2.2 Tipos de centrales solares

- Sistemas fotovoltaicos
- Sistemas térmicos

7.2.3 Centrales solares que son parte de generadoras de Chile

- AES Gener: 1 central solar
- Enel: 8 centrales solares
- Cerro Dominador: 3 centrales solares
- EDF: 2 centrales solares
- Engie: 2 centrales solares

7.3 Planta eólica

Esta planta consiste en la generación de energía eléctrica mediante la acción del viento, que es captado por aerogeneradores.

Los aerogeneradores, también conocidos como “molinos de viento”, son de tamaño variable, capaz de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica, mediante sus aspas. Estas estructuras pueden instalarse en suelo firme como en suelo marino.

“El potencial eólico se calcula en función de la distribución de la velocidad del viento. Los aerogeneradores situados en sitios donde las medias de velocidad del viento son de 8 metros por segundo en la altura del eje del rotor producen entre el 75% y el 100% más de electricidad que aquellas donde el viento sopla a una media de 6 metros por segundo. Un aerogenerador de 1,8 MW situado a un buen emplazamiento produce más de 4,7 millones de unidades de electricidad cada año. Esto es suficiente para satisfacer las necesidades de más de 1.500 hogares.” [14]

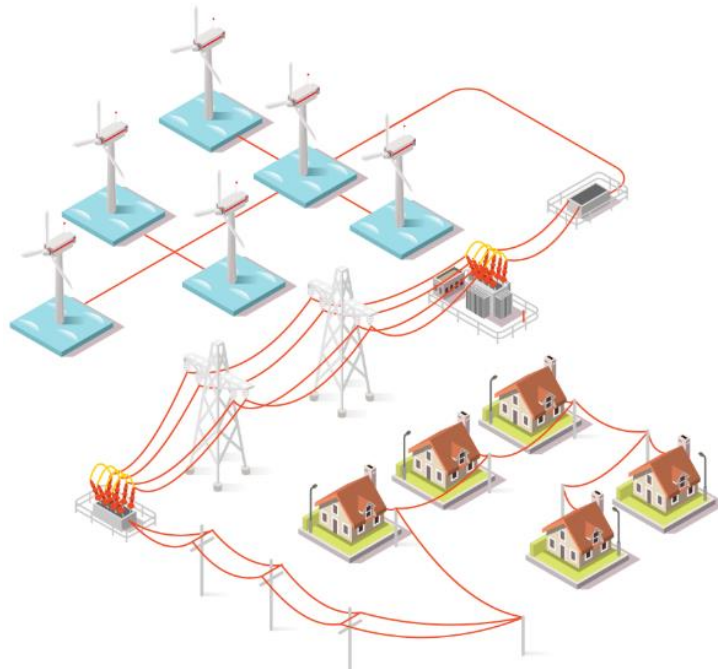


Ilustración 16. Planta eólica. (Fuente: www.generadoras.cl)

7.3.1 Capacidad instalada de energía eólica

Durante los últimos años, se ha incrementado la instalación de este tipo de energías, debido a la disminución de los costos. En el mundo^[13] para el año 2015 existían 435 GW, de los cuales 64 se incorporaron ese mismo año. Para el año 2017 en Chile, existen 1.305 MW de instalaciones de energía eólica, logrando un incremento del 6% en el sistema, como se detalla a continuación.

	Eólica (MW)	Total (MW)	Participación de energía eólica (%)
SEN	1.299	22.369	6
SEA	4	62	6
SEM	3	104	3
Total	1.305	22.535	6

Tabla 32. Planta eólica y su participación. (Fuente: Ministerio de Energía, Energía Abierta, 2017)

7.3.2 Tipos de centrales eólicas

- Aerogeneradores con turbinas de eje horizontal
- Aerogeneradores con turbinas de eje vertical

7.3.3 Centrales eólicas que son parte de generadoras de Chile

- Enel: 8 centrales eólicas
- PacificHydro: 1 central eólica
- Engie: 1 central eólica

7.4 Planta térmica

En este tipo de plantas, se produce energía eléctrica a partir de combustibles fósiles como carbón, diésel, gas natural o combustible mixto, mediante un ciclo termodinámico de agua-vapor.

“El combustible quemado en la caldera calienta agua y la transforma en vapor a una presión muy elevada, haciendo girar una turbina y un alternador para producir electricidad. El vapor que sale de la turbina se envía a un elemento llamado condensador para convertirlo en agua y así retornarlo a la caldera para empezar un nuevo ciclo de producción de vapor.”^[15]



Ilustración 17. Planta térmica. (Fuente: www.generadoras.cl)

7.4.1 Capacidad instalada de energía térmica

Para diciembre de 2017, en Chile, existen 4.809 Mw de instalaciones eléctricas con tecnologías de petróleo, gas natural y a carbón, logrando un incremento de 56% en el sistema, tal como se muestra en la siguiente tabla^[13].

	Carbón (MW)	Petróleo diésel (MW)	Gas natural (MW)	Total térmico (MW)	Total Chile (MW)	Participación de energía térmica (%)
SEN	4.809	2.930	4.421	12.160	22.369	54
SEA	0	35	0	35	62	57
SEM	0	15	86	101	104	97
total	4.809	2.981	4.506	12.296	22.535	55

Tabla 33. Energía térmica y su participación. (Fuente: Ministerio de energía. Energía Abierta, 2017)

7.4.2 Centrales termoeléctricas que son parte de generadoras de Chile

- AES Gener: 6 centrales térmicas
- Orazul: 1 central térmica
- Enel: 9 centrales térmicas
- GPG: 6 centrales térmicas
- Colbún: 5 centrales térmicas
- EDF: 4 centrales térmicas
- Engie: 7 centrales térmicas

7.5 Bioenergía

Consiste en la generación de energía eléctrica mediante la energía almacenada en la materia orgánica.

La materia prima de la bioenergía puede tener origen en los residuos forestales y/o agrícolas, actividades de ganado y desechos de madera. Esto se realiza mediante un proceso termo-químico que consiste en la combustión, gasificación o digestión anaeróbica de la materia prima^[16].

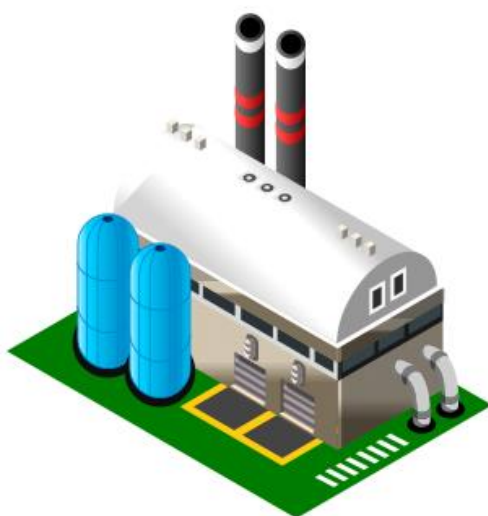


Ilustración 18. Planta bioenergía. (Fuente: www.generadoras.cl)

7.5.1 Capacidad instalada en bioenergía

Para finales del año 2017, existen en Chile 463 MW provenientes de bioenergía, logrando un incremento del 2% de la capacidad instalada del sistema, como se muestra en la tabla siguiente.

	Bioenergía (MW)	Total Chile (MW)	Participación de bioenergía (%)
SEN	463	22.363	2
SEA	0	62	0
SEM	0	104	0
Total	463	22.535	2

Tabla 34. Bioenergía y su participación. (Fuente: WEC, World Energy Resources – Biomass, 2016)

7.5.2 Tipos de centrales de bioenergía

- Bioenergía (Biomasa/Biogas)

7.5.3 Centrales que son parte de generadoras de Chile

- AES Gener: 1 central

7.6 Planta geotérmica

Son aquellas que producen electricidad mediante el calor proveniente de las profundidades de la tierra.

Estas plantas requieren de elevadas temperaturas (150°C a 370°C) provenientes de recursos hidrotérmicos (agua y vapor). Tienen un factor de capacidad entre el 60% y 90%, al no ser afectadas por cambios climáticos, lo que permite que produzcan energía constante.

El potencial de energía es elevado, pero solo se puede utilizar una parte dependiendo de las condiciones geológicas. Chile forma parte del cinturón de Fuego del Pacífico, por lo que contiene un gran potencial geotérmico estimado en 2.000 MW en el norte y 1.350 MW en la zona central. En el año 2017, se inauguró la primera planta geotérmica de América del Sur con un total de 48 MW^[17].



Ilustración 19. Planta geotérmica. (Fuente: www.generadoras.cl)

7.6.1 Tipos de centrales geotérmicas

- Plantas de vapor flash
- Plantas de vapor seco
- Plantas de ciclo binario

En la siguiente tabla, se pueden apreciar algunas centrales con sus respectivas potencias en MW.

Nombre	Empresa	Matriz	Tipo de central	Potencia (MW)
Abanico	Endesa	Endesa	Hidroeléctrica de Pasada	129
Alfalfal	AES Gener	AES Gener	Hidroeléctrica de Pasada	178
Andina	E-CL	Suez Energy Andino	Termoeléctrica de Carbón	165
Angamos I	E.E. Angamos	AES Gener	Termoeléctrica de Carbón	260
Angamos II	E.E. Angamos	AES Gener	Termoeléctrica de Carbón	260
Antilhue TG	Antilhue	Colbún	Termoeléctrica de Gas	101,8
Antuco	Endesa	Endesa	Hidroeléctrica de Embalse	324
Atacama	Gas Atacama	Endesa	Termoeléctrica de Gas	780,6
Bocamina	Endesa	Endesa	Termoeléctrica de Carbón	127
Cabrero	Masisa Ecoenergía	Masisa	Biomasa	11,1
Calle Calle	PSEG Generación	SAESA	Termoeléctrica de Gas	20
Campanario	Campanario	Southern Cross	Termoeléctrica de Gas	165
Candelaria (I y II)	Colbún	Colbún	Termoeléctrica de Gas	272
Canela I	Central Eólica Canela	Endesa	Eólica	18,2
Canela II	Central Eólica Canela	Endesa	Eólica	60
Canutillar	Antilhue	Colbún	Hidroeléctrica de Embalse	172
Capullo	E.E. Capullo	E.E. Capullo	Hidroeléctrica de Pasada	11,03
Cenizas	Eléctrica Cenizas	Eléctrica Cenizas	Termoeléctrica de Gas	16,29
Chacabuquito	Obras y Desarrollo	Colbún	Hidroeléctrica de Pasada	28,4
Chapiquiña	E-CL	Suez Energy Andino	Hidroeléctrica de Pasada	10,2
Chiburgo	Colbún	Colbún	Hidroeléctrica de Pasada	19,4
Pangue	E.E. Pangue	Endesa	Hidroeléctrica de Embalse	456
Pehuenche	E.E. Pehuenche	Endesa	Hidroeléctrica de Embalse	551
Rapel	Endesa	Endesa	Hidroeléctrica de Embalse	380
Renca	Sociedad Eléctrica Santiago	AES Gener	Termoeléctrica de Gas	100

Tabla 35. Centrales eléctricas en Chile y su producción en MW (Fuente: www.centralenergia.cl, Elaboración propia).

CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS FODA DE ESTA SUGERENCIA Y COMPARACIÓN CON ALTERNATIVAS

El análisis FODA es una herramienta que permite determinar las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas dentro de una empresa, organización, persona o proyecto, para obtener un análisis interno y externo detallado y mejorar las situaciones que puedan provocar un daño en la realización de un proyecto.

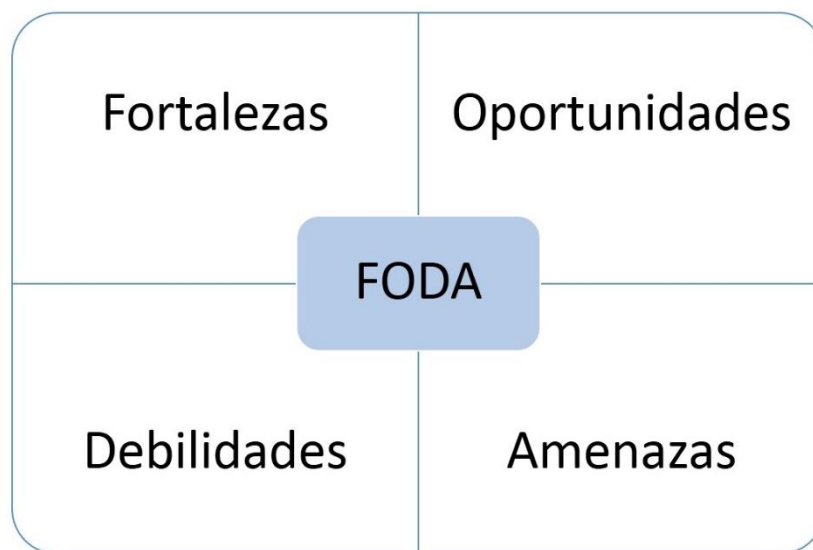


Ilustración 20. Análisis FODA. (Fuente: www.analisisfoda.com)

El creador de la matriz FODA fue Albert S. Humphrey, quien murió en octubre del año 2005. Este estudio se llevó a cabo con la finalidad de tener en conocimiento el por qué la planificación corporativa a largo plazo fracasaba ^[19].

Para este proyecto de tesis se realiza el siguiente análisis FODA.

Fortalezas:

- Equipo innovador
- Aumento de empleos
- Ayuda con el medio ambiente

Oportunidades

- Crecimiento en la industria minera

Debilidades

- Mayor inversión
- Requerimiento de personal capacitado
- Falta de realización

Amenazas

- Centrales eléctricas con mayor producción de energía

De acuerdo a los cálculos realizados anteriormente, podemos ver que la máxima potencia de energía se produce cuando el equipo posee una eficiencia global de 80%, con temperatura inicial 800°C y temperatura de salida 200°C, con porcentaje de cobre de 5%, dando un total de 217,9 MW.

Si lo comparamos con las centrales eléctricas del país (Tabla 35), podemos apreciar que genera más energía que muchas otras plantas ya operativas en el país, por ejemplo, genera más energía que la central termoeléctrica de carbón Bocamina, que genera 127 MW, la central de biomasa Cabrero genera solo 11,1 MW, la termoeléctrica de gas Calle Calle, genera 20 MW y las centrales eólicas Canela I y II, generan 18,2 MW y 60 MW respectivamente.

Por otro lado, sabemos que la planta fotovoltaica ^[20] San Andrés ubicada en Copiapó, genera 50,6 MW, y que la central hidroeléctrica de pasada Purísima, ubicada en Molina, genera tan solo 0,43 MW.

Ahora, poniéndonos en el peor de los casos, el cual sería una eficiencia global del equipo de tan solo 60%, con una entrada de granalla a temperatura 800°C y con salida de 700°C, se generarían 22,9 MW, y aun así este equipo generaría más energía que otras centrales del país.

CAPÍTULO IX: DISCUSIONES

Como bien es sabido, la minería es el mayor aporte económico de nuestro país, pero aun así esta industria genera una cantidad importante de desechos que son depositados en el medio ambiente, causando un impacto ambiental.

El propósito de este proyecto de tesis es convertir esos desechos, en este caso escoria de cobre, en energía eléctrica. Siendo esto, un impacto positivo para la industria minera del país, al ser un proyecto innovador y que puede generar un impacto a nivel mundial.

Para poder realizar este proyecto, es necesario contar con la ayuda de profesionales expertos en el área, quienes puedan instruir y capacitar a personas para realizar este trabajo. Es importante mencionar que se trabajaría con temperaturas muy elevadas, por lo que se requiere de un extremo cuidado de la integridad física de todo personal involucrado.

Al ser proyecto de investigación, no se tiene la certeza de que pueda ser 100% factible, pero se demuestra que es posible realizar un equipo para poder generar energía eléctrica a partir de escorias provenientes de procesos de fundición.

En cualquier análisis sobre el sector, se debe tener en claro que sin energía no es posible desarrollar la minería. Ello cobra especial relevancia, considerando que la industria cuenta con una potente cartera de proyectos de inversión, que requieren necesariamente para su materialización, este importante insumo.

La minería es una actividad intensiva en energía, donde los combustibles y la electricidad son los principales factores de este ítem y los que muestran los valores más altos en la estructura de costos de la industria.

Es por esto, que el desarrollar este proyecto es relevante, para que esa misma energía pueda ser utilizada en los mismos procesos mineros, ya sea en faenas, campamentos, oficinas, entre otros. Y así mismo, pueda ser utilizado en cualquier rubro.

Para el diseño experimental de esta tesis, se fijaron tres eficiencias parciales para cumplir con lo propuesto en el ciclo de Carnot, las cuales corresponden a cada circuito del proceso con eficiencias de 92, 88 y 84%, para dar una eficiencia global del sistema de 80, 70 y 60% respectivamente.

Además, se trabajó con distintos tipos de escorias, las cuales poseen diferentes porcentajes de cobre, de 5, 10, 15, 35 y 50%. Esto influye de cierta manera en el cálculo de balance de energía, ya que define la cantidad de MW que se generan según el porcentaje de cobre y su eficiencia.

La base de cálculo utilizada para este proyecto fue de 1KTh, dato que se puede ir modificando para realizar las comparaciones con otras centrales de energía eléctrica presentes en el país.

CAPÍTULO X: CONCLUSIONES

Se puede concluir, que una vez finalizado este proyecto de tesis, se cumplieron los objetivos propuestos en un inicio. Además, el realizar este sistema de generación de energía mediante escorias fundidas contribuye con el medio ambiente, al no arrojar desechos al suelo.

Al situarnos en el mejor de los casos, el cual sería con una eficiencia global del 80%, temperatura de entrada de granalla de escoria de 800°C y temperatura de salida de 200°C y porcentaje de cobre 5%, nos da una potencia de 217,9 MW, valor que está por encima de lo que produce, por ejemplo, la central termoeléctrica de Gas Renca, con una potencia de 100 MW, las centrales hidroeléctricas de pasada, Abanico y Alfalfal con potencias de 128 y 178 MW respectivamente, la central termoeléctrica de Carbón Bocamina, con potencia 127 MW y la central eólica Canela II con potencia 60 MW, entre otras.

En el caso de situarnos en el peor de los casos, el cual sería una eficiencia global de 60%, temperatura de entrada de granalla de escoria de 800°C y temperatura de salida de 700°C y porcentaje de cobre 50%, nos da una potencia de 22,9 MW, valor que aún se encuentra por encima de algunas centrales eléctricas presentes en el país, como por ejemplo, la termoeléctrica de gas Calle Calle, con potencia de 20 MW, la central biomasa Cabrero con 11,1 MW y la hidroeléctrica de pasada Chiburgo con 19,4 MW, entre otras.

Como la base de cálculo fue de 1.000 toneladas por hora, y en el mejor de los casos da una potencia de 217,9 MW, es posible realizar regla de tres y conocer el valor de la potencia que estarían botando al medio ambiente, las distintas fundiciones presentes en el país. Se concluye que la fundición Potrerillos, está arrojando al suelo el equivalente a 14,9 MW, fundición Ventanas 9,9 MW, Chuquicamata 32,3 MW, Caletones 33,8 MW y Paipote 8,7 MW.

Por otra parte, sabemos que en China se producen 15,5 millones de toneladas de escoria al año, lo que equivale a una potencia de 385,5 MW.

En Chile se producen alrededor de 11,5 millones de toneladas de escoria al año, lo que da una potencia de 286 MW, lo que equivale a más de 15 veces la potencia que produce la central eólica Canela I.

Finalmente, se concluye que en el país se está botando una cantidad importante de energía al suelo, y se ha estado realizando durante años, mientras se quejan de la falta de energía eléctrica, queriendo potenciar el negocio del cobre y sacar ventaja sobre los competidores, pero no se dan cuenta de que en realidad se está perdiendo una cantidad importante de energía eléctrica.

REFERENCIAS

1. Quingbo yu, J. I. (2015). Thermal energy recovery from high temperature blast furnace. China: Sevier
2. USM. (2017, marzo 23). www.noticias.usm.cl. Retrieved from www.noticias.usm.cl
3. SKM, S. K. (2008). Proyecto multidisciplinario de recuperación de energía desde escoria de cobre fundida.
4. Granallador de escoria, Recuperador de energía, presentación, Codelco El Salvador, Marzo 2011, El Salvador.
5. Comisión Chilena del cobre (agosto, 2015). Tecnologías en fundiciones de cobre. Retrieved from https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tecnologias_fundiciones_v1.pdf
6. Jie, Yan. «Latest development of oxygen bottom - blowing copper smelting technology.» Copper 2013, 2013: 873-886.
7. Davis Carrero Valdés (2018). Tesis Ingeniero Civil en Minas UNAB.
8. Natalia Cepeda López y Vannia Torres Muñoz (2019). Tesis Ingeniero Civil en Minas UNAB.
9. Física Termodinámica. Biografía de Nicolas Leonard Sadi Carnot. Retrieved from <https://hernanleon1002.wordpress.com/fisica-de-fluidos-y-termodinamica/tercer-corte/biografias/nicolas-leonard-sadi-carnot/>
10. Generadoras de Chile. Energía Hidroeléctrica. Retrieved from <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-hidroelectrica>
11. Ministerio de Energía, Estudio de Cuencas, 2016.

12. Generadoras de Chile. Energía Solar. Retrieved from <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-solar>
13. Ministerio de Energía, Energía Abierta, 2017
14. Generadoras de Chile. Energía Eólica. Retrieved from <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica>
15. Generadoras de Chile. Energía Térmica. Retrieved from <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-termica>
16. WEC, World Energy Resources – Biomass, 2016
17. WEC, World Energy Resources - Geothermal, 2018 / IEA, Geotermia, 2018
18. Central de Energía, Central de Información y Discusión de Energía en Chile. Retrieved from <http://www.centralenergia.cl/centrales/mapa-centrales-operacion/>
19. Riquelme Leiva, Matias (2016, Diciembre). FODA: Matriz o Análisis FODA – Una herramienta esencial para el estudio de la empresa. Santiago, Chile. Retrieved from <https://www.analisisfoda.com/>
20. Centrales hidroeléctricas y termoeléctricas de Chile. Retrieved from <http://www.icarito.cl/2009/12/74-7286-9-centrales-hidroelectricas-y-termoelectricas-de-chile.shtml/>